



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**MECHANICKÉ VLASTNOSTI SVARU TITANOVÉ SLITINY
TIAL6V4 PŘIPRAVENÉHO POMOCÍ TECHNOLOGIE
ELEKTRONOVÉHO PAPRSKU**

MECHANICAL PROPERTIES OF THE WELD OF TITANIUM ALLOY TIAL6V4 PREPARED BY USING AN
ELECTRON BEAM TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Robin Byrtus

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Libor Válka, CSc.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Bc. Robin Byrtus**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Libor Válka, CSc.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Mechanické vlastnosti svaru titanové slitiny TiAl6V4 připraveného pomocí technologie elektronového paprsku

STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA PROBLEMATIKY ÚKOLU

Titanová slitina TiAl6V4 je jako konstrukční materiál používána v řadě aplikací, přičemž pro spojování konstrukčních dílů vyrobených z uvedené slitiny jsou kvůli obtížné svařitelnosti konvenčními metodami používány technologie zahrnující např. lepení, pájení apod. Jednou z perspektivních metod spojování dílů z titanových slitin je svařování elektronovým paprskem.

CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Práce bude zaměřena na studium mechanických vlastností a lomového chování svaru titanové slitiny TiAl6V4. Cílem práce bude na základě metalografických analýz a mechanických zkoušek vyhodnotit použitelnost technologie svařování elektronovým paprskem pro spojování dílů z uvedené slitiny.

SEZNAM DOPORUČENÉ LITERATURY

PTÁČEK, L. et al. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-72-248-3.

VELES, P. Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. Bratislava: Praha: Alfa; SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1985, 401 s.

ČSN ISO 148-1. Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda. Praha: ÚNMZ, 2010.

ČSN EN ISO 6892-1. Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Praha: ÚNMZ, 2010.

ČSN EN ISO 6892-2. Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 2: Zkušební metoda za zvýšené teploty. Praha: ÚNMZ, 2011.

ČSN EN ISO 6892-3. Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 3: Zkušební metoda za nízké teploty. Praha: ÚNMZ, 2015.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

.....
prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.

ředitel ústavu

.....
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je zhodnotit mechanické vlastnosti a lomové chování svaru titanové slitiny Ti6Al4V připraveného pomocí technologie elektronového paprsku. Teoretická část práce se zabývá problematikou svařování titanových slitin za pomoci svazku elektronů, hodnocením svařitelnosti titanových slitin, vlivem svařování elektronovým svazkem na mikrostrukturu a metodami zkoušení svarových spojů. Pomocí experimentů byly vyhodnoceny mechanické vlastnosti základního materiálu a svaru a byla provedena strukturní analýza svaru.

ABSTRACT

The aim of the diploma thesis is to evaluate the mechanical properties and fracture behavior of the weld join Ti6Al4V titanium alloy prepared by using an electron beam technology. The theoretical part deals with the welding of titanium alloys with the help of electron beam, the weldability evaluation of titanium alloys, the influence of electron beam welding on the microstructure and the methods of testing of weld joints. Using the experiments, the mechanical properties of the base material and the weld were evaluated and a structural analysis of the weld was performed.

KLÍČOVÁ SLOVA

Svařování elektronovým svazkem, zkoušení svarových spojů, titanová slitina Ti6Al4V, mechanické vlastnosti, destruktivní zkoušení, nedestruktivní zkoušení.

KEYWORDS

Electron beam welding, testing of welded joints, titan alloy Ti6Al4V, mechanical properties, destructive testing, non-destructive testing.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BYRTUS, R. *Mechanické vlastnosti svaru titanové slitiny TiAl6V4 připraveného pomocí technologie elektronového paprsku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Libor Válka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Mechanické vlastnosti svaru titanové slitiny TiAl6V4 připraveného pomocí technologie elektronového paprsku vypracoval samostatně s použitím zdrojů uvedených v seznamu literatury.

V Brně 25. května 2018

.....

Bc. Robin Byrtus

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Liboru Válkovi, CSc. a také panu Ing. Petru Havlíkovi, za veškerou pomoc, vstřícnost, odborné rady a připomínky, které mi pomohly vypracovat tuto diplomovou práci. V neposlední řadě chci poděkovat rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

1. SVAŘOVÁNÍ TITANOVÝCH SLITIN	4
1.1. Svařitelnost titanových slitin	4
1.2. Technologie svařování	4
1.3. Technologie EBW – svařování elektronovým svazkem	7
1.3.1. Svazek elektronů	8
1.3.2. Interakce elektronového svazku s materiálem	9
1.3.3. Zařízení pro svařování	10
2. ZKOUŠENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ	13
2.1. Vady svarových spojů	13
2.2. Příčiny vzniku vad	14
2.3. Nedestruktivní zkoušení svarů	15
2.4. Destruktivní zkoušení svarů	17
2.4.1. Zkouška tahem	17
2.4.2. Zkouška rázem v ohybu	18
2.4.3. Zkouška ohybem	18
2.4.4. Zkouška tvrdosti	19
3. EXPERIMENT	21
3.1. Materiál, polotovary, geometrie zkušebních těles	21
3.1.1. Titanová slitina Ti-6Al-4V	21
3.1.2. Polotovary	22
3.1.3. Zkušební tělesa	23
3.2. Zkoušky mechanických vlastností	25
3.2.1. Zkoušky tahem	25
3.2.2. Zkoušky rázem v ohybu	25
3.2.3. Zkoušky ohybem	26
3.2.4. Měření mikrotvrdosti	26
3.3. Výsledky experimentů	27
3.3.1. Výsledky zkoušek tahem základního materiálu a svarů	27
3.3.2. Výsledky zkoušek rázem v ohybu základního materiálu a svarů	28
3.3.3. Výsledky ohybových zkoušek	29
3.3.4. Výsledky měření mikrotvrdosti	30
3.3.5. Metalografická analýza	33
4. DISKUZE VÝSLEDKŮ	36
ZÁVĚR	39
LITERATURA	40
SEZNAM SYMBOLŮ	44

SEZNAM ZKRATEK	45
SEZNAM OBRÁZKŮ	46
SEZNAM PŘÍLOH	47

Úvod

Spojování materiálů, ať už mluvíme o pájení nebo svařování, patří bezesporu mezi nejrozšířenější technologie ve strojírenské výrobě. Za první metodu svařování můžeme označit kovářské svařování, které šlo ruku v ruce s prvními metalurgickými pokusy. Teprve na konci 19. století dochází k rozvoji tří moderních metod svařování – elektrickým obloukem, plamenem a odporového svařování. Tyto metody svařování byly studovány a rozvíjeny v 80. letech 19. století a vzápětí aplikovány v průmyslu. [1]

V důsledku stále se zvyšujících nároků na svarové spoje byly rozvíjeny další metody svařování, jako například svařování laserem, svařování třením nebo svařování pomocí elektronového paprsku. Právě poslední zmiňovaná metoda je vhodná pro svařování lehkých slitin, mezi které můžeme zařadit titanovou slitinu Ti-6Al-4V, která byla v této práci použita jako experimentální materiál. Titanové slitiny se v průmyslu začaly objevovat především díky jejich vynikajícím mechanickým vlastnostem a dobré korozní odolnosti. Slitina Ti-6Al-4V je jednoznačně nejpoužívanější slitinou titanu, a to hlavně díky její malé hustotě. Má přibližně polovinu měrné hmotnosti ocelí a niklových slitin, velmi dobré mechanické vlastnosti, dobrou odolnost vůči korozi (především vůči chloridům, mořské vodě, kyselému a oxidačnímu prostředí), dobré vlastnosti za zvýšených teplot (až do 400 °C). Slitina se nejčastěji používá v žíhaném stavu nebo je podrobena stárnutí. Typickými aplikacemi této slitiny jsou např. lopatky kompresorů, disky a kroužky pro tryskové motory, tlakové nádoby, skříně raketových motorů, náboje rotorů vrtulníků, spojovací materiál a mnoho dalších. [2]

Pro zajištění spolehlivosti, bezpečnosti, a především kvality svarových spojů je potřeba jejich kontroly jako nedílné součásti výrobního procesu. Metody pro kontrolu svarových spojů lze jednoduše rozdělit na destruktivní a nedestruktivní. V případě destruktivního zkoušení dochází k nevratnému poškození svarů, ale je možné poměrně dobře simulovat provozní podmínky. Nedestruktivní metody kontroly svarů jsou využívány především na již hotových součástech, které nesmějí být nijak mechanicky poškozené či jinak testováním ovlivněné.

Cílem diplomové práce je vyhodnocení vlastností svaru titanové slitiny Ti-6Al-4V, která se mj. používá pro výrobu oběžných kol kompresorů. Svařovat titanové slitiny lze i rozšířenými konvenčními metodami, ty však nesou určitá rizika (především možnost reakce tavné lázně se vzdušným kyslíkem) a nedají se dobře automatizovat. V práci je hodnocena vhodnost použití metody svařování pomocí elektronového svazku pro slitinu Ti-6Al-4V, a to vyhodnocením mechanických vlastností a lomového chování svaru této slitiny. Posuzovány jsou vlastnosti základního materiálu a svaru na základě mechanických zkoušek a strukturních analýz.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1. SVAŘOVÁNÍ TITANOVÝCH SLITIN

Svařování titanových slitin je na rozdíl od svařování ocelí v mnoha ohledech náročnější. Důvodem je to, že titan je velice reaktivní s kyslíkem za zvýšených teplot, a proto je třeba v případě tavných metod svařování dbát na to, aby byl proces svařování prováděn v ochranné atmosféře nebo vakuu. Tuto ochranu je důležité zajistit až do doby, kdy teplota svařence klesne pod teplotu 450 °C. Pokud je používána ochranná atmosféra, je potřeba kontrolovat čistotu a vlhkost plynu. Nachází-li se v ochranném plynu větší množství vodíku, vznikají ve svaru póry, které jsou nežádoucí z důvodu zhoršení mechanických vlastností svarového spoje. [3]

Je důležité zmínit, že materiál je před svařováním nutno zbavit všech nečistot a nutné je také odmaštění, aby nedošlo ke vzniku nežádoucích pórů. Nedoporučuje se odmašťování ve vodě obsahující chloridy kvůli možnosti vyvolání korozního praskání. Oxidy se odstraňují ve 2 – 4% roztoku kyseliny fluorovodíkové (HF) nebo v 30 – 40% roztoku kyseliny dusičné. Při čištění je doporučeno používat neželezné kartáče, aby nedošlo ke kontaminaci povrchu železem, které je stabilizátorem β -fáze a může tak způsobit její vznik. β -fáze vznikající na povrchu součástí má nepříznivý vliv především na korozní odolnost slitiny. [3, 4]

1.1. Svařitelnost titanových slitin

Obecně lze říci, že svařitelnost titanu závisí na tom, jak dobře je svarová lázeň a tepelně ovlivněná oblast chráněná inertním plynem před okolní atmosférou. Titan totiž za zvýšených teplot velmi dobře reaguje s plyny (O, N). Titan má schopnost pohlcovat plyny asi od 500 °C, což ve velké míře ovlivňuje jeho svařitelnost. Pohlcení velmi malého množství plynů titanem během svařování způsobí zvýšení jeho pevnosti a pokles houževnatosti. Je-li množství pohlcených plynů větší, dochází k úplnému zkřehnutí svarového spoje. [5]

Čistý titan má dvě morfologie, kdy se přibližně při teplotě 882 °C mění z mřížky HCP (α -fáze) na fázi β , která má kubickou plošně centrovanou mřížku (FCC). Prvky stabilizující fázi α zvyšují tuto transformační teplotu, kdežto legující prvky stabilizující fázi β mají opačný vliv. U slitin titanu dochází k fázové transformaci $\alpha \rightleftharpoons \beta$ jak při ohřevu, tak při ochlazování. Podle charakteru přeměny základního materiálu v tepelně ovlivněné oblasti se mohou tyto přeměny srovnávat s přeměnou ocelí. Dochází-li k přehřátí titanu nad teplotu přeměny $\alpha \rightarrow \beta$, dochází ke značnému růstu velikosti zrna β . Řada slitin s α fází poměrně málo mění vlastnosti tepelně ovlivněné oblasti v závislosti na teplotním cyklu svařování. Slitiny s β fází jsou citlivější na teplotní cyklus svařování. Tepelně ovlivněná oblast má po svařování a úplném vychlazení vysokou tvrdost a křehkost. [5]

1.2. Technologie svařování

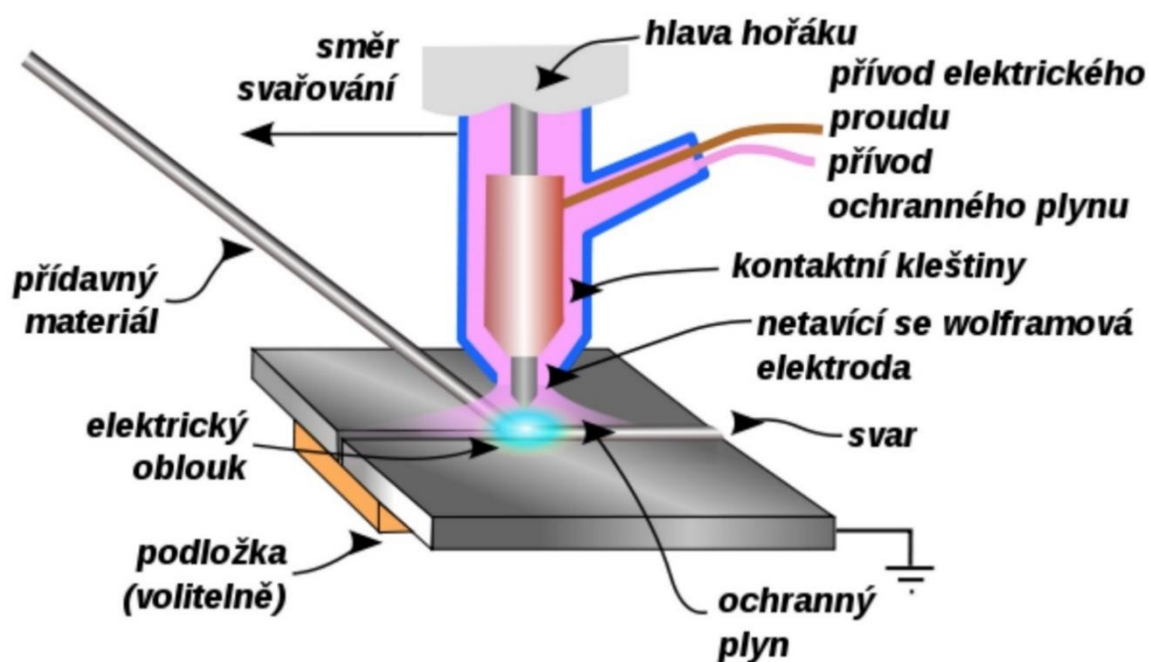
Existuje poměrně hodně způsobů svařování titanu a jeho slitin. Co se týče konvenčních způsobů, jednoznačně převládají metody WIG a MIG, které jsou ve zkratce popsány níže. Konvenčně lze svařovat titan a jeho slitiny i dalšími technologiemi, např. elektrickým odporovým svařováním bodovým nebo elektrickým odporovým svařováním stykovým s odtavením. Z nekonvenčních technologií lze použít svařování laserem, plasmové svařování nebo svařování pomocí technologie EBW, na kterou je tato práce zaměřena. Detailní popis a rozbor metody EBW je uveden v kapitole 1.3.

Svařování v ochranných inertních plynech metodami WIG a MIG se používá v závislosti na tloušťce stěny svařovaného kusu. Pokud se nesvařuje ve zvláštních komorách naplněných

ochranným plynem, musí být také spodní strana svarového spoje (kořenová oblast) dokonale chráněna. Používá se argon s čistotou min. 99,7 hm. %. [5]

Technologie WIG

Metoda svařování WIG (z německého výrazu Wolfram Inert Gas), označovaná také zkratkou TIG (z anglického Tungsten Inert Gas) se řadí mezi tavné svařování. Jedná se o svařování pomocí elektrického oblouku, který vniká a následně hoří mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem, viz obr. 1.1. Během procesu je svarová lázeň, elektroda a nejbližší okolí svaru chráněno inertním plynem před účinky okolní atmosféry (hlavně kyslíku a dusíku ze vzduchu). Jako inertní (netečný) plyn se používá argon, helium, případně jejich směsi. U této metody je možné provést svařování buď roztavením a slitím základních materiálů dohromady (bez použití přídavného materiálu), nebo lze použít přídavný materiál, jako jsou svařovací přídavné tyčinky (dráty) podobného složení jako má základní materiál. [6, 7]



Obr. 1.1 Princip svařování metodou WIG. [8]

WIG svařování se v převážné většině případů provádí ruční metodou, kdy svářeč drží v jedné ruce hořák a druhou rukou přidává potřebné množství přídavného materiálu ve formě drátu, který se natavuje v tavné lázni. Svařování metodou WIG však lze poměrně dobře částečně mechanizovat nebo úplně automatizovat. Při částečné mechanizaci svářeč stále drží v ruce hořák, ale drát je podáván bowdenem pomocí speciálního, motorem hnaného, podavače do oblouku. Při úplné automatizaci je hořák upnut ve vhodném stroji (například robotu) a vše je řízeno automaticky, jak vedení hořáku, tak přidávání drátu. [9]

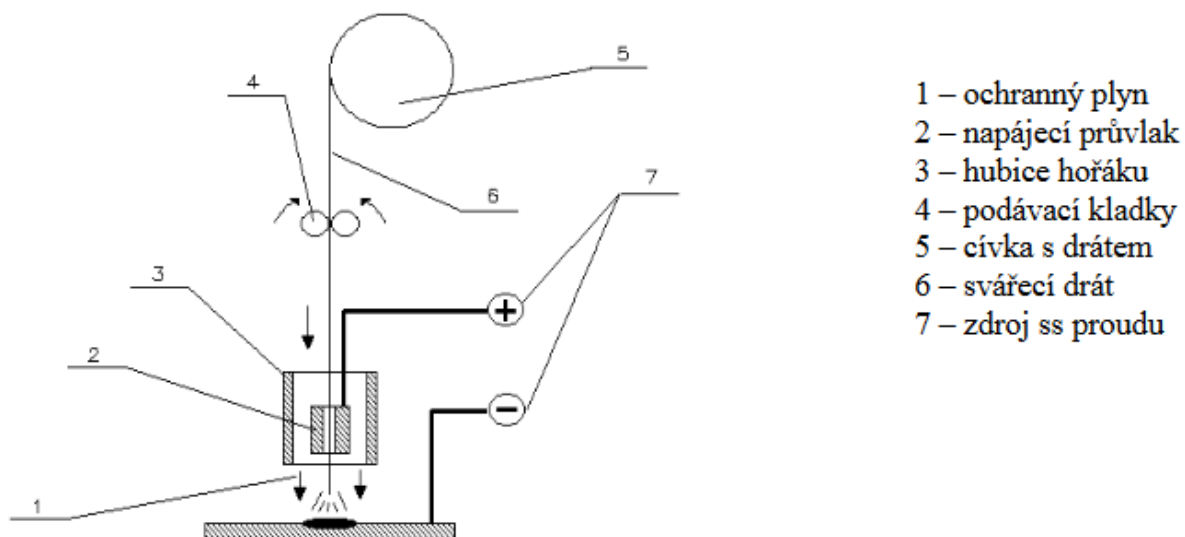
Hlavní **výhodou** svařování metodou WIG je výborná kontrola nad svarovou lázní. U jiných metod svařování elektrickým obloukem dochází k neustálému přísunu materiálu do lázně. To se u svařování metodou WIG neděje, a proto může svářeč daleko lépe ovlivňovat svarovou lázeň a tím i vlastnosti svarového spoje. Přídavný materiál si svářeč do lázně přidává dle potřeby. Metodou WIG lze také svařovat zcela bez přídavného materiálu (např. roztavením lemu u lemového spoje), což je z metalurgického hlediska nejlepší, neboť tak dosáhneme stejného chemického složení u svarového kovu a základního materiálu. Nedochází k zavlečení

jiných prvků do svarového kovu. Další nespornou výhodou je vysoká teplota oblouku. Díky tomu je možné svařovat i materiály, které mají vysokou teplotu tání (např. vysokolegované oceli). Teplotní pole je velmi úzké, a proto nedochází k tepelnému ovlivnění základního materiálu v širokém pásmu a je možno dosáhnout velké hloubky závaru. To má mimo jiné pozitivní vliv na deformace vzniklé ve svařenci vlivem svařování. Při svařování metodou WIG je možno používat velmi malé proudy, což je důvodem, proč je možno tuto metodu použít i při svařování tenkých materiálů. [9]

Nevýhodou svařování metodou WIG je poměrně vysoká náročnost na svařovací zařízení, především při použití střídavého proudu. Obecně lze říci, že zařízení pro WIG svařování je komplikovanější a dražší než běžnější metody svařování. To platí zejména pro metodu WIG AC (využívá střídavého proudu), která je dosti složitá, má velký počet regulačních prvků a je tedy dražší. Její využití v průmyslu ovšem stále narůstá a díky všeobecnému poklesu cen elektroniky klesá i její cena. Podstatnou nevýhodou je také malá produktivita. Především bavíme-li se o ručním svařování. [9]

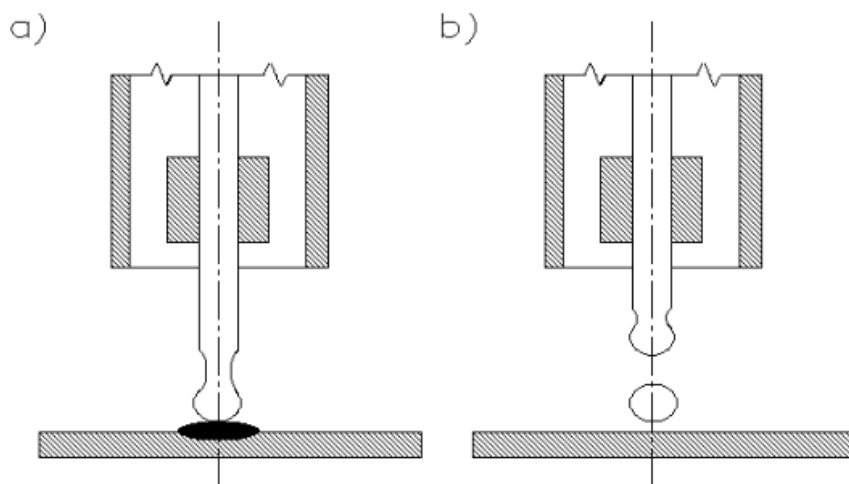
Technologie MIG

MIG (Mettal Inert Gass) je metoda svařování velmi podobná předcházející metodě s tím rozdílem, že se využívá tavící se elektrody. Základem je opět využití elektrického oblouku mezi holou elektrodou a základním materiálem, díky kterému dochází k natavení materiálu. Elektroda v tomto případě plní funkci jak nositele oblouku, tak přídavného materiálu. Svařovací drát (elektroda) se skrze posuvné kladky zavádí do svařovacího hořáku, kde v tak zvané kontaktní trubici dochází k přestupu proudu. Aby nedošlo ke kontaminaci lázně a tavící se elektrody vzdušnými plyny, je volný konec elektrody soustředně obklopený plynovou hubicí. Jako inertního plynu se opět využívá argonu a hélia nebo směsi těchto plynů. Tato metoda je velice efektivní a je vhodná pro automatizované svařování. Základní materiál není potřeba před svařováním nijak složitě připravovat, je doporučeno pouze očištění drátěným kartáčem těsně před svařováním. V některých případech je doporučen předehřev základního materiálu. Schéma metody MIG je uvedeno na obr. 1.2. [10, 11, 12]



Obr. 1.2 Schéma zařízení pro svařování metodou MIG. [13]

Technologie MIG využívá zdroj stejnosměrného svařovacího proudu, na jehož kladný pól je připojen napájecí průvlek. Podobně jako u svařování obalenou elektrodou je katoda tvořena základním materiálem. Podle toho, jakým způsobem je podáván přídavný materiál do svarové lázně rozeznáváme dva druhy procesů: [13]



Obr. 1.3 a) zkratový proces, b) bezzkratový (sprchový) proces. [13]

a) **zkratový proces** – vzniká vodivý můstek mezi elektrodou a tavnou lázní prostřednictvím tvořící se kapky, díky čemuž vzniká zkrat ve svařovacím obvodu. Dochází ke zvyšování teploty vodivého můstku špičkovým zkratovým proudem a urychluje se tak odtavení kapky. Frekvence odtavování je asi 200 až 300 kapek za sekundu. Tento proces však klade vysoké nároky na dynamické vlastnosti zdroje svářecího proudu,

b) **bezzkratový proces** – tento proces je charakteristický průměrem kapky, který je vždy menší než vzdálenost elektrody a tavné lázně. Využívá se vyššího proudového zatížení elektrody.

1.3. Technologie EBW – svařování elektronovým svazkem

Technologie svařování pomocí svazku elektronů lze zařadit mezi způsoby tavného svařování. Využívá se fokusovaného svazku o vysoké energii, který dopadá na svařovaný spoj. Zde se mění kinetická energie elektronů na tepelnou a tím dochází k natavování materiálu. Při interakci elektronů s materiálem dochází k okamžitému vypařování kovu při teplotách okolo 25 000 °C. Vnášené teplo proniká hluboko do materiálu, což umožňuje svařování mnohem větších tloušťek než u ostatních svařovacích procesů. Nicméně, protože je elektronový svazek úzce fokusovaný, celkové vnesené teplo je mnohem menší než při konvenčních způsobech svařování. Výsledkem je minimální tepelné ovlivnění okolního materiálu a tepelně ovlivněná oblast (TOO) je velmi malá. Díky těmto vlastnostem technologie EBW jsou deformace způsobené procesem svařování nepatrné. Na druhou stranu dochází k rychlému ochlazování svařence, což u ocelí s vysokým obsahem uhlíku může způsobit vznik trhlin. [1, 15]

Metoda svařování EBW je charakteristická následujícími vlastnostmi:

- extrémně vysoká hustota výkonu ($10^7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) v ohnisku svazku (viz tab.1.1),
- přenos energie nenastává vedením tepla skrze povrch svařované součásti, ale mnohem efektivněji přímo uvnitř samotné součásti,
- není potřeba upravovat povrch součástí před svařováním,

- není potřeba použití přídavného materiálu,
- u rovných svarů je možno dosáhnout velkých rychlostí svařování a u součástí svařovaných touto metodou dochází jen k velmi malým deformacím způsobeným teplotním ovlivněním,
- díky vlastnostem elektronového svazku lze svařovat i materiály, které jsou za běžných podmínek obtížně svařitelné či nesvařitelné,
- je možno svařovat dílce velmi složitých tvarů a velikostí,
- svařování probíhá ve vakuu, není potřeba používat ochranné plyny (argon, helium),
- je možné počítačově řídit elektrické i mechanické svařovací parametry,
- parametry svařování a z toho plynoucí kvalita svarů jsou dobře reprodukovatelné a konzistentní. [14]

Tab. 1.1 Maximální hustota výkonu různých zdrojů tepla používaných při svařování. [14]

Zdroj tepla	Maximální hustota výkonu [W·cm ⁻²]
Plamen	5·10 ³
Elektrický oblouk	5·10 ⁴
Plazma	5·10 ⁵
Laserový paprsek	5·10 ⁷
Elektronový svazek	5·10 ⁷

1.3.1. Svazek elektronů

Svazkem elektronů pro účel svařování označujeme proud elektronů, který se šíří ve vakuu přibližně jedním směrem a stejnou rychlostí. Vlastnosti svazku vycházejí z vlastností samotného elektronu, což je elementární částice se záporným elektrickým nábojem $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Vzhledem k malé hmotnosti elektronů je možné jejich urychlení až na 0,75 násobek rychlosti světla. Elektrony navíc interagují s elektromagnetickým polem, díky čemuž je možná jejich fokusace. [16]

Jako zdroj elektronů pro elektronový svazek se nejčastěji používá wolframová elektroda, ze které jsou termoemisí uvolněny elektrony vlivem Coulombovy síly. Urychlovacím napětím U je elektronům dodávána kinetická energie, čímž se zvětšuje také jejich rychlost \vec{v} . Na svazek pohybujících se elektronů působí elektromagnetické pole Lorentzovou silou

$$\vec{F} = -e\vec{E} - e \cdot \vec{v} \times \vec{B}, \quad (1.1)$$

kde \vec{E} je intenzita elektrického pole, \vec{B} je magnetická indukce a e je elektrický náboj volného elektronu. Kinetickou energii elektronu můžeme vyjádřit vztahem:

$$E_k = e \cdot U = \frac{1}{2}mv^2, \quad (1.2)$$

kde U je urychlovací napětí a $m = 9,108 \cdot 10^{-31}$ kg je hmotnost elektronu. [17]

1.3.2. Interakce elektronového svazku s materiálem

Účelem elektronového svazku při dopadu na povrch svařované součásti je roztavit a částečně také vypařit materiál na co nejmenší ploše. To, do jaké hloubky jsou elektrony schopny proniknout v materiálu určuje energie elektronů (urychlovací napětí) a hustota materiálu, do kterého pronikají (viz tab. 1.2). [4]

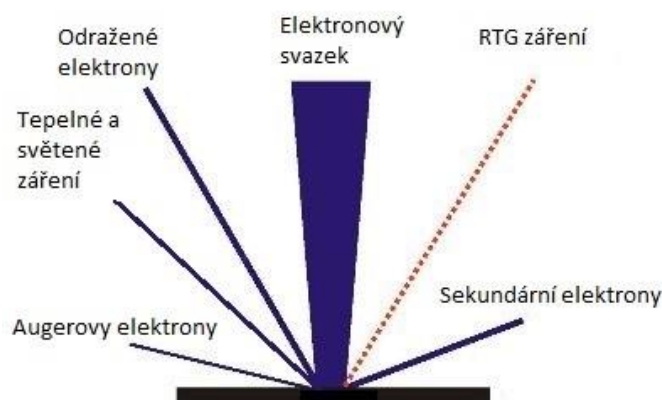
Tab. 1.2 Penetrační hloubka elektronů v různých materiálech. [4]

	Mg	Al	Ti	Cu	Fe	W
60 kV	35 μm	23 μm	14 μm	7 μm	8 μm	3 μm
120 kV	112 μm	72 μm	43 μm	22 μm	25 μm	10 μm

Při dopadu urychlených a zaostrěných elektronů na svařovanou součást dochází díky jejich vysoké kinetické energii k průniku hluboko do materiálu. Elektrony jsou při srážkách s částicemi materiálu brzděny a dochází k přeměně jejich kinetické energie na teplo. Část elektronů předává svou kinetickou energii krystalové mřížce (v několika nepružných odrazech). Při svařování je důležité, aby toto proběhlo u co největšího počtu elektronů. Hloubka, do jaké jsou elektrony schopny proniknout do materiálu je dána vztahem: [19 – 21]

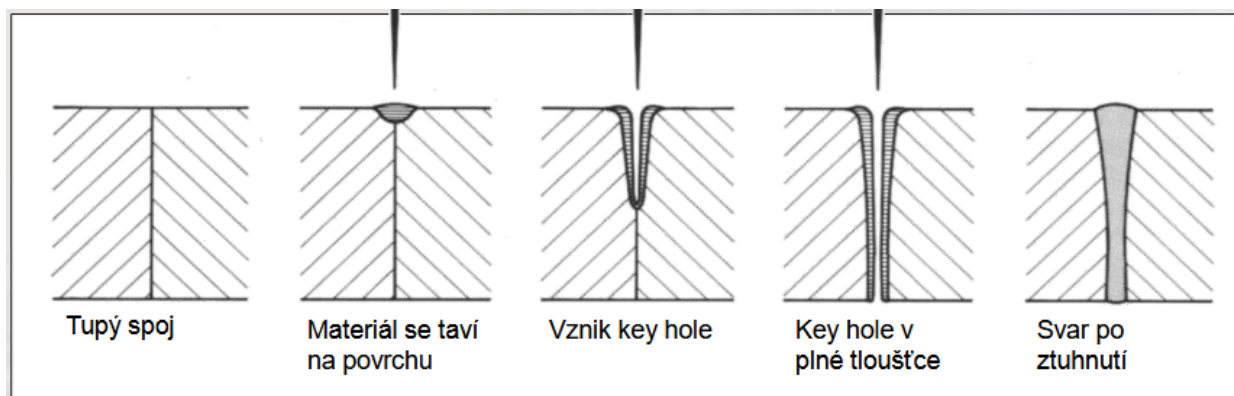
$$h = 2,1 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\rho} U^2 \text{ [mm]} \quad (1.3)$$

Poměrně velká část (až 70%) dopadajících elektronů se odrazí od povrchu zcela bez ztráty energie nebo jen s částečnou ztrátou energie, obr. 1.4. Při interakci s materiálem dochází k tomu, že jsou některé vodivostní elektrony vyraženy elektrony ze svazku za vzniku tzv. sekundárních elektronů. Při změně rychlosti elektronů vzniká spojitě, tzv. „brzdné“ rentgenové záření, kromě tzv. „charakteristického záření“ na určitých vlnových délkách, charakteristických pro různé materiály. Část energie svazku se také spotřebuje na vyzáření světlo a teplo. Jsou vyzařovány Augerovy elektrony. Všechny tyto jevy jsou považovány za ztráty a pohybují se v intervalu 10 – 40 % energie svazku. [19, 21]



Obr. 1.4 Interakce elektronů s materiálem. [21]

Při dopadu elektronů na materiál dochází během několika μs k roztavení materiálu, vzápětí k varu kovu a k vytvoření úzké kapiláry vyplněné parami kovů o nízkém tlaku. Díky vakuu v pracovní komoře páry rychle expandují a dutina se velmi rychle prohlubuje. Zároveň tlak expandující páry zaručí, že se tavenina ve svaru udrží na stěně kapiláry. Hloubka dutiny závisí na kinetické pohybové energii elektronů, rychlosti posuvu a materiálových vlastnostech. Dochází ke vzniku tzv. „Key hole“ (viz obr. 1.5). [1, 19]



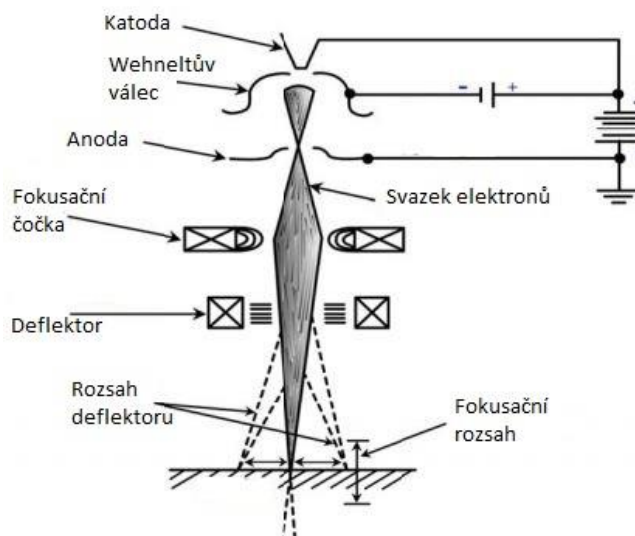
Obr. 1.5 Fáze vzniku „Key hole“. [19]

1.3.3. Zařízení pro svařování

Podle typu a použití se sestava určená ke svařování elektronovým svazkem může skládat z velkého množství různých komponent. Mezi základní části zařízení pro svařování elektronovým paprskem můžeme zařadit elektronové dělo, pracovní komoru a manipulační systém. Nesmíme však opomenout také vakuový a řídicí systém.

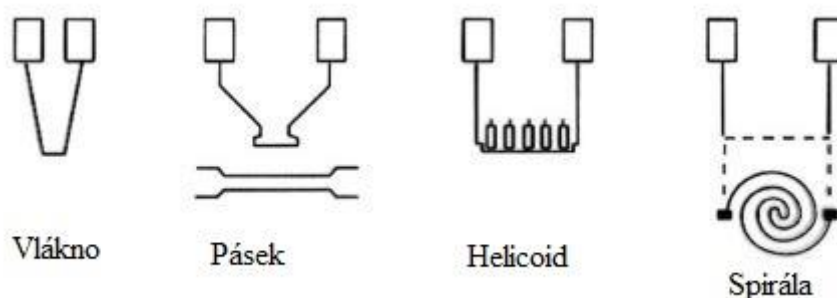
Elektronové dělo

Elektronové dělo je nejdůležitější součástí celého zařízení, neboť představuje řízený zdroj elektronového svazku. Lze jej rozdělit na dvě části, a to na samotný zdroj elektronů (emitor, katoda) a na elektronovou optiku (fokusační čočka, deflektor). Schéma elektronového děla je uvedeno na obr. 1.6.



Obr. 1.6 Schéma elektronového děla. [22]

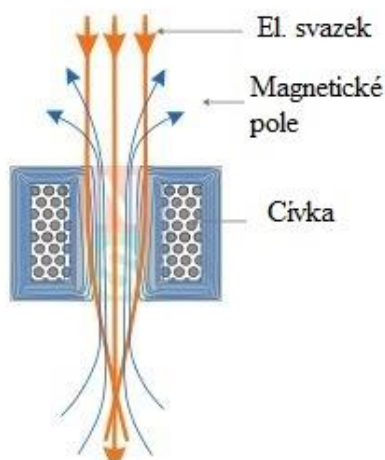
Elektronové dělo má za úkol generovat, akcelarovat a zaměřovat (fokusovat) elektronový paprsek v požadovaném směru a do určitého bodu na svařované součásti. Existují dva typy elektronového děla, kdy u prvního typu dochází k urychlení elektronů díky rozdílnému potenciálu mezi katodou a anodou, tzv. samočinně zrychlující dělo. U druhého typu dochází k urychlování elektronů na základě rozdílného potenciálu mezi katodou a svařovanou součástí, která přebírá funkci anody. Jak je zřejmé z obr. 1.6, elektronové dělo se skládá z katody, která díky termoemisi emituje volné elektrony. Nejčastěji je vyrobena z wolframového drátu nebo pásky, viz obr. 1.7. Další částí je anoda, která je pozitivně nabitá a přitahuje elektrony, vyprodukované katodou. Urychluje elektrony vlivem rozdílného potenciálu. U vysokonapěťových zařízení se rozdílný potenciál pohybuje okolo 70 kV – 150 kV, u nízkonapěťových zařízení je to přibližně 15 kV – 30 kV. Wehneltovým válcem lze ovládat množství elektronů emitovaných z katody. [22, 23]



Obr. 1.7 Různá geometrie katody. [23]

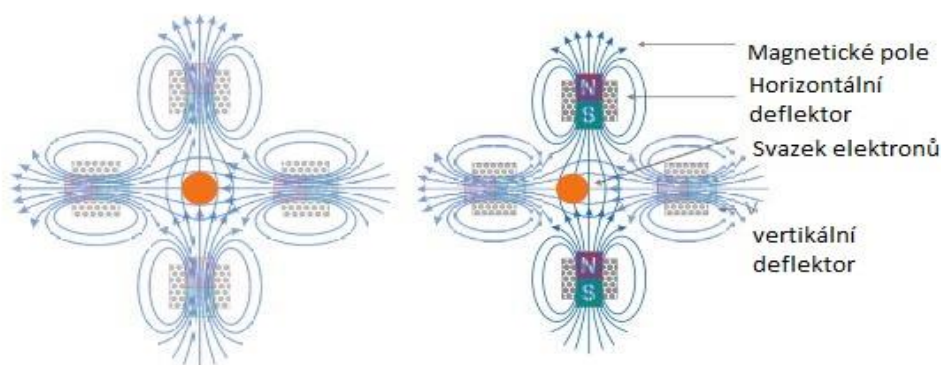
Elektronová optika

Elektronová optika slouží především k přesnému usměrnění elektronového paprsku do určitého bodu a hloubky na svařenci. Skládá se z fokusační čočky a deflektoru. Působením magnetického pole lze zaostřit elektronové paprsky podobně jako světelné paprsky při použití optických čoček. *Fokusační čočka* (obráz. 1.8) se skládá z cívky, které vytváří magnetické pole. Ohnisková vzdálenost takovéto čočky závisí na energii elektronů, na proudu v cívkce a na konstrukci cívky. Ohniskovou vzdálenost lze velmi jednoduše řídit změnou proudu v cívkce. [4]

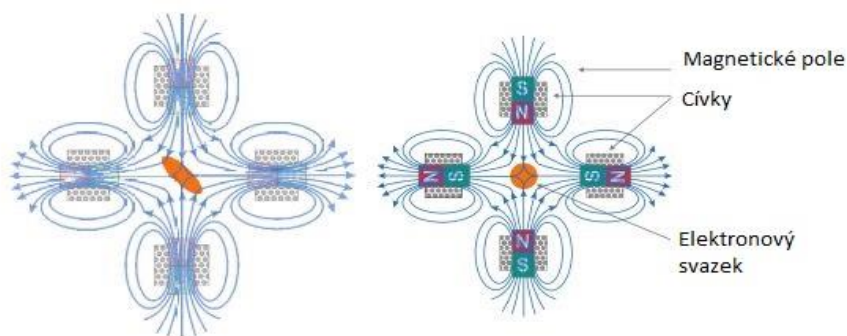


Obr. 1.8 Magnetická (fokusační) čočka. [4]

Deflektor se opět skládá z cívek, které vytvářejí magnetické pole podobné poli, vznikajícímu u magnetu tvaru podkovy. Uspořádáním takovýchto cívek kolmo k elektronovému svazku tedy vytváří rovnoběžné magnetické pole, díky kterému lze paprsek vychylovat do stran. Řízení paprsku je zcela bez mechanického pohybu a tedy velice rychlé, což umožňuje s využitím příslušného softwaru vytvořit na svařenci velmi složité tvary. Použitím komplikovanějšího uspořádání cívek v deflektoru je možné vytvořit tzv. magnetické multipóly, čímž dosáhneme modifikace tvaru průřezu paprsku. Tento princip je obvykle používán ke korekci astigmatismu. Na obr. 1.9 je vidět, jakým způsobem deflektor ovlivňuje paprsek působením homogenního magnetického pole. Obr. 1.10 znázorňuje princip úpravy paprsku z důvodu korekce astigmatismu. [4]



Obr. 1.9 Deflektor vychylující elektronový svazek působením magnetického pole. [4]



Obr. 1.10 Možnost modifikace tvaru průřezu elektronového svazku působením magnetického multipólu. [4]

Pracovní komora

Jedná se o komoru, ve které je vytvořeno vakuum za pomoci vakuového čerpadla. Používají se jak mechanická, tak difúzní čerpadla, pokud je potřeba vysokého vakua. Elektrony mohou velmi snadno interagovat s atomy plynů, které se nacházejí v pracovní komoře. Touto interakcí by ale docházelo k vychylování elektronového svazku a také ke ztrátě energie. Podle tlaku v pracovní komoře rozdělujeme vakuum na střední ($p = 10^{-1} - 10 \text{ Pa}$) a vysoké ($p = 10^{-2} - 10^{-3} \text{ Pa}$). [4, 22, 24]

Manipulační systém

Manipulační systém zajišťuje možnost pohybu svařence vůči elektronovému svazku a zajišťuje jeho uchycení při procesu svařování.

2. ZKOUŠENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ

Ve skutečnosti není žádný konstrukční materiál, zhotovený běžnými technologiemi, používaný pro stavbu strojů a zařízení, zcela bez vad. V každém kovovém materiálu se již od výroby vyskytuje velké množství submikroskopických vad (na úrovni zrn, krystalových mřížek a atomů), což je dáno hlavně tím, jakým způsobem se tvoří struktura, nedokonalostmi výrobních technologií (mechanické nebo tepelné zpracování), lidským faktorem (tj. nedodržování stanovených parametrů jednotlivých postupů zpracovatelských technologií) a dalších podmínek. Vady zásadně ovlivňují vlastnosti materiálu, a proto je důležité jejich studium a predikce. [25, 26]

2.1. Vady svarových spojů

Vadou materiálu nebo výrobku (svaru) se rozumí každá odchylka od vlastností předepsaných technickými normami, technickými podmínkami, případně smluvním vzorkem. Vady svaru mohou být zjevné nebo skryté. Zjevné vady jsou takové, které lze zjistit při vizuální kontrole pouhým okem nebo jednoduchými pomůckami. Vady skryté obvykle zjistíme pomocí přístrojů nebo laboratorními zkouškami. Podle ustanovení příslušných předpisů mohou být vady přípustné nebo nepřípustné, opravitelné nebo neopravitelné. Za přípustné vady považujeme vady, které normy, technické podmínky nebo smluvní vzorek dovolují a není nutné jejich odstranění. Vady, které neodpovídají povoleným hodnotám, jsou nepřípustné a mohou být opravitelné nebo neopravitelné. Do provozu pak můžeme připustit pouze svary s takovými typy vad, které při známém provozním zatížení neohrozí bezpečnost svařovaných konstrukcí. [25, 26, 27]

Defekty, vyskytující se ve svarových spojkách a návarech, rozdělujeme podle tvaru a podle polohy výskytu. Podle tvaru zařazujeme vady ve svarech do tří hlavních skupin: [27]

- vady bodové,
- vady plošné,
- vady objemové.

Do první skupiny řadíme vady typu mikropórů, případně malé sférické vměstky (např. silikáty). do druhé skupiny zařazujeme vady typu trhlin, neprůvarů a studených spojů. Ve třetí skupině jsou především vady typu plynových dutin (pórů, bublin), vměstků (struskové, tavidlové, oxidické, kovové), staženiny (mezidendritické, kráterové), ale také zápaly, vruby, nedodržení rozměrů (hubený kořen, krápníky, převýšený svar, propadlý svar) a nepravidelný povrch svaru.

Podle polohy vad ve svaru rozlišujeme vady: [27]

- povrchové, které se nacházejí na povrchu svaru (např. trhliny, studené spoje a svarové ploše, zápaly, neprovařený kořen, póry),
- vnitřní, které se nacházejí pod povrchem svaru a nevystupují vůbec na povrch svaru (plynové dutiny, bubliny, póry, vměstky, staženiny).

Na obr. 2.1 jsou schematicky znázorněny vady ve svaru podle tvaru a polohy.



Obr. 2.1 Vady ve svařech podle tvaru a polohy. [27]

Podle charakteru se vady rozdělují a číselně označují v souladu s normou ČSN EN ISO 6520-1 [28] a ČSN EN ISO 6520-2 [29] následujícím způsobem:

- trhliny (které se dále dělí např. na podélné, příčné, kráterové, nespojité, rozvětvené, ...),
- dutiny (např. póry, bubliny, staženiny – vyskytují se jako jednotlivé nebo ve shlucích a řadách),
- vměstky (např. struskové, tavidlové, oxidické, kovové),
- studené spoje (není zde kovová vazba, materiál nebyl nataven a je pouze „nalepený“),
- neprůvody,
- vady tvaru a rozměru (zápaly, vruby v kořeni, vruby mezi jednotlivými housenkami, nadměrné převýšení svaru, ...),
- různé vady (např. rozstřík, vytržený povrch, vada stehu, brusné stopy, ...).

2.2. Příčiny vzniku vad

Trhliny vznikající ve svařech lze podle způsobu vzniku rozdělit na trhliny za tepla, trhliny za studena, žíhací trhliny a lamelární trhliny. *Trhliny za tepla* vznikají při teplotách okolo 1280 – 800 °C, při tuhnutí a ochlazování tavné lázně. Příčinou jejich vzniku je především chemické složení základního materiálu (vysoký obsah uhlíku, manganu a dalších legur), případně vyšší obsah síry. *Trhliny za studena* vznikají obvykle v intervalu teplot 300 – 200 °C po skončení svařování a po transformaci austenitu na rozpadové struktury při společném působení vodíku (především difúzního) a tahových napětí ve svaru. *Lamelární trhliny* mohou vznikat jak v základním materiálu, tak v místech tepelně ovlivněné oblasti (TOO), pokud je tato zóna při svařování namáhána ve směru tloušťky plechu (koutový svar). Vznikají především za vysokých teplot, ale šířit se mohou i za studena. *Žíhací trhliny* vznikají při žíhání svarů (např. při rychlém ohřevu na žíhací teplotu) nebo u vícevrstvých svarů. Vznikají buď v nízkoteplotní oblasti (do 300 °C) v důsledku velkého teplotního gradientu mezi povrchem a středem svarového spoje nebo v oblasti dolních žíhacích teplot (500 – 600 °C), především u ocelí na bázi chromu a vanadu.

Dutiny, například póry, bubliny jsou objemové vady kulovitěho nebo protáhlého tvaru, vyplněné plynem. Vznikají při nedostatečné ochraně tavné lázně před vlhkostí ve vzduchu, při nedostatečně očištěných svarových plochách, použitím nevysušených bazických elektrod apod.

Vměstky neboli *inkluze* mohou být různého typu. Např. struskové vznikají při svařování obalenou elektrodou při nedokonalém odstranění strusky mezi jednotlivými svařovanými vrstvami, když struska předbíhá oblouk nebo je špatně položena svarová housenka. Oxidické vměstky vznikají především v důsledku nedokonalého čištění povrchu. Vyskytují se především u oxidů hliníku a hořčíku (mají vysoký bod tání). Kovové vměstky (např. wolframové) vznikají při svařování metodou TIG (WIG) při namočení wolframové elektrody do tavné lázně, nebo při zapalování oblouku dotykem o svařovaný materiál, v důsledku vysokých proudů nebo porušením plynové ochrany.

Studený spoj je zapříčiněn nedokonalým tavným spojením svarového kovu se základním materiálem nebo navařenou housenkou. Mezi hlavní příčiny vzniku studených spojů patří nízký svařovací proud, nesprávné vedení elektrody, velká rychlost svařování, případně nevhodně volený (malý) průměr elektrody.

Neprůvar, nejčastěji neprovařený kořen, vzniká v důsledku neúplného natavení základního materiálu nebo přilehlých svarových housenek. Nejčastěji se objevují při svařování metodami MIG/MAG při zkratovém procesu. Mezi hlavní příčiny vzniku patří špatné sestavení před svařováním s malou mezerou v kořeni, nízké nastavení svařovacího proudu nebo vysoká rychlost svařování a předběhnutí svarové lázně.

Vady *tvaru a rozměru*, například zápaly na okraji povrchu svaru jsou ostrá natavená prohloubení na hranicích svarové housenky a základního materiálu a vznikají vytavením základního materiálu. Vzniklý vrub již není zaplněn svarovým kovem. Častěji se vyskytují u koutových svarů a mezi hlavní příčiny vzniku patří příliš velký svařovací proud, dlouhý oblouk, nevhodný průměr elektrody, případně její špatné vedení. Nadměrné převýšení svaru vzniká nedostatečnou zručností svářeče a lze jej většinou odstranit broušením. Přetečení krycí nebo kořenové vrstvy vzniká často při svařování vodorovného svaru na svislé stěně při použití příliš velkého průměru obalené elektrody a malé zručnosti svářeče. Vadné napojení, nesprávné rozměry svaru, nadměrná šířka, nedostatečná tloušťka koutového svaru jsou většinou způsobeny malou zručností svářeče a lze je následně opravit. [26]

2.3. Nedestruktivní zkoušení svarů

Nedestruktivní zkoušky svarů jsou nejrozšířenější skupina zkoušek svarových spojů, protože výrobky se po zkoušce dají bez problémů dále používat. Vycházejí z jednoduchého (ale i velmi zjednodušeného názoru), že pokud se ve svarovém spoji nevyskytují vady (nebo jenom malé nebo málo četné), tak bude svarový spoj dobře sloužit v provozu. Toto tvrzení je jen částečně platné, ale v praxi většinou nemáme možnost ověřovat zcela prokazatelně všechny užité vlastnosti svarových spojů. Např. pevnost svarového spoje, plastické vlastnosti, odolnost proti cyklickému namáhání a podobně nelze vůbec spolehlivě z nedestruktivních zkoušek určit. Proto je nutné přijmout fakt, že nedestruktivní zkoušky prokáží pouze částečně dosažené užité vlastnosti svarového spoje. [26]

Směrnicí pro volbu metod nedestruktivního zkoušení svarových spojů je norma ČSN EN 12 062 [30].

Podle toho, zda identifikujeme vady na povrchu svaru nebo uvnitř svaru lze nedestruktivní metody používané pro kontrolu jakosti svaru rozdělit na metody zjišťování povrchových vad [26]

- vizuální zkouška,
- penetrační (kapilární) zkouška,
- magnetická prášková zkouška

a na metody zjišťování vnitřních vad

- prozáření (RTG),
- ultrazvuková zkouška.

Vizuální zkouška

Vizuální kontrolou lze ověřit defekty pouze na povrchu svaru. Jedná se o nejjednodušší, nejdostupnější a nejlevnější defektoskopickou metodu pro kontrolu svarů. V podstatě se jedná

o pouhou prohlídku prostým zrakem nebo v přísnější podobě pomocí zraku a optických přístrojů s několikanásobným zvětšením (lupa). Vizualní kontrolu rozdělujeme na přímou a nepřímou. Přímá vizualní kontrola je prováděna pouhým okem nebo s použitím jednoduchých optických pomůcek. Nepřímá vizualní kontrola je taková, kdy je nutné použít optické přístroje (např. endoskop), abychom byli schopni rozeznat detaily na površích, které nejsou přímou vizualní zkouškou pozorovatelné, kupříkladu na vnitřním povrchu nádob. Při této zkoušce je důležitým dobře očištěný povrch svaru od strusky, rozstříku apod. Zkouška by měla být provedena před dalšími technologickými operacemi (např. nátěry) na dobře přístupném povrchu svaru a při dobrém osvětlení.

Penetrační (kapilární) zkouška

Metoda je založena na vzlínivosti některých kapalin (uhlovodíků, např. petroleje) do otevřených dutin materiálu. Využívá se kapilárních jevů, především smáčivosti a vzlínivosti. Z toho vyplývá, že tato zkouška odhalí pouze vady, které jsou na povrchu svaru otevřené, aby do nich mohla vniknout detekční tekutina.

Metoda má několik fází zkoušení. První z nich je dokonalá příprava povrchu umytím a odmaštěním. Druhá fáze spočívá v nanesení zkušební kapaliny (penetrantu) na zkoušený povrch, při čemž dochází k zatečení kapaliny do dutin vad. Třetí fází je odstranění přebytku penetrantu umytím povrchu od zkušební kapaliny. U této operace je důležité, aby nedošlo k příliš důkladnému očištění. To by způsobilo vyplavení detekční kapaliny z dutin vad. Také nedostatečné očištění je problémem, neboť pak dochází k výskytu nepravých indikací. Po tomto kroku následuje osušení povrchu a vyvolání indikace, nanesení „vývojký“ (tzn. vytvoření kontrastního a nasákavého podkladu pro kapalinu vzlínající z dutin vady, zajišťující lepší viditelnost vady). Základem vývojek bývá oxid zinečnatý, nejčastěji jeho suspenze v acetonu. Poslední fází je prohlídka povrchu a vyhodnocení vad.

Magnetická prášková zkouška

Principem zkoušky je zviditelnění magnetických siločar vystupujících na povrch materiálu. Zjišťuje se rozptyl magnetického toku, který vznikne ve zmagnetovaném feromagnetickém materiálu v místě necelistvostí (trhlin) nebo náhlé změny magnetických vlastností (struska). Touto metodou je možné zjistit povrchové nebo těsně podpovrchové vady (v maximální hloubce asi 2 – 3 mm). Metodu je možné použít pouze na feromagnetické materiály.

Zkouška ultrazvuková

Metoda zkoušení svarů za pomoci ultrazvuku je založena na principu šíření akustického vlnění zkoušeným předmětem, jeho reakci na změny ve zkoušeném předmětu a následnou registraci. Rozlišujeme dva typy zkoušení ultrazvukem, a to metodu průchodovou a odrazovou. v případě průchodové metody dochází k vytvoření tzv. ultrazvukového stínu za překážkou (vadou). Ultrazvukovým stínem rozumíme snížení akustického tlaku procházející vlny. Na dvou protilehlých površích se souose umístí vysílací a přijímací sonda a měří se hodnoty ultrazvukové energie, která projde zkoušeným předmětem. V případě odrazové metody dochází k vysílání krátkého ultrazvukového impulsu, který se odráží od všech rozhraní (vad i povrchů), vrací se zpět do sondy a časový průběh je zobrazován na obrazovce. Je všestranně použitelná a poskytuje informace nejen o vadách, ale i o struktuře materiálu, rozměrech apod.

Zkouška prozářením (RTG)

Metoda je určena ke zjišťování vnitřních vad a někdy i pro zjišťování povrchových, ale nepřístupných vad. Využívá se schopnosti každého prvku pohlcovat (zeslabit) elektromagnetické záření procházející materiálem, přičemž je v tomto případě používáno

rentgenové (RTG) nebo gama záření. Jedná se o nejstarší metodu nedestruktivního zkoušení. Při průchodu RTG záření materiálem dochází k jeho pohlcování. Cílem této metody je zviditelnit prošlé záření vhodným detektorem a určit tak místa, ve kterých se vyskytují vady. V takových místech je záření pohlcováno méně a na detektoru (filmu) se potom jeví jako tmavší místa. [26]

2.4. Destruktivní zkoušení svarů

Destruktivní metody zkoušení svarových spojů jsou nástrojem, jak důkladně kontrolovat mechanické vlastnosti svarového spoje. Dokážeme takto určit pevnostní vlastnosti, deformační vlastnosti, houževnatost, tvrdost, celistvost svarových spojů. Destruktivní zkoušení materiálu je nevratný proces. Kontroly jsou prováděny na zkušebních vzorcích, které jsou odebírány z kontrolovaného svarového spoje. Je zde tedy předpoklad, že pokud všechny zkoušky kontrolovaného kusu splní určené požadavky, splní je také výrobky, u kterých je použita daná technologie svařování. To lze očekávat jen v případě, že jsou dodrženy stejné technologické postupy jak při výrobě zkušebních těles, tak při výrobě konečných produktů. [25, 31, 32]

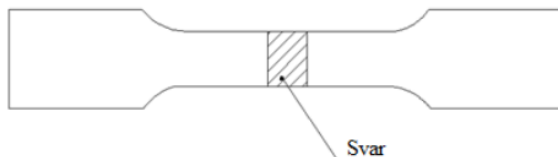
2.4.1. Zkouška tahem

Zkouška tahem je základní statickou mechanickou zkouškou jak pro určování vlastností základního materiálu, tak svarů. Výstupem této zkoušky je závislost napětí na deformaci zkušební tělesa, obvykle jednoduchého tvaru (nejčastěji kruhového nebo obdélníkového průřezu), které je uchyceno do čelistí zkušebního stroje a je na něm nainstalovaný průtahoměr. Během zkoušky je zaznamenávána závislost působící síly F (zatížení snímané dynamometrem) na prodloužení zkušební tyče ΔL (snímané průtahoměrem). Z těchto údajů jsou poté určeny požadované veličiny, např. mez pevnosti, mez kluzu, tažnost, kontrakce apod. [25,33]

Při zkoušení mechanických vlastností svarů, rozlišujeme dva základní typy zkoušek tahem podle orientace zkušební tělesa vůči svarovému spoji. Jedná se o

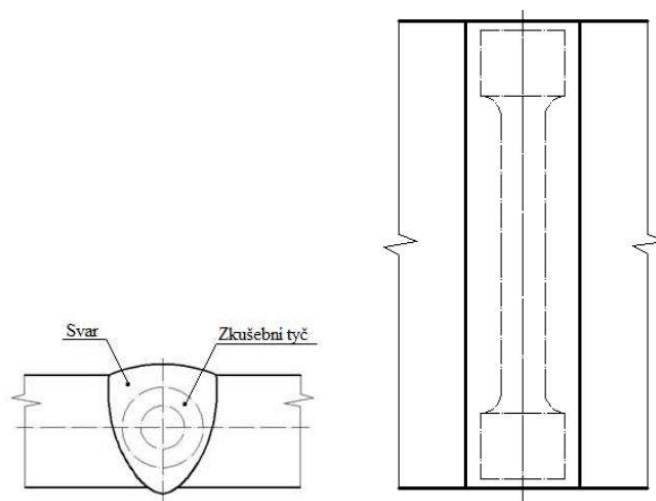
- podélnou tahovou zkoušku (koresponduje s normou ČSN EN ISO 6892-1 [34]) a
- příčnou tahovou zkoušku (ČSN EN ISO 4136 [35]).

U příčné tahové zkoušky se zkušební tělesa odebírají příčně vzhledem ke svarovému spoji a to tak, aby po opracování ležela osa svaru ve středu zkoušené délky zkušební tyče, viz schéma na obr. 2.2. [32, 33, 35]



Obr. 2.2 Zkušební těleso pro příčnou zkoušku tahem. [33]

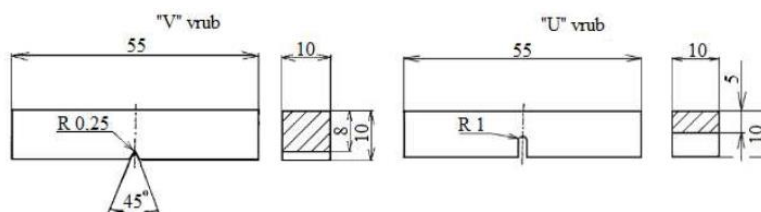
V případě podélné tahové zkoušky je orientace zkušební tyče rovnoběžná s podélnou osou svaru, vzorek se tedy odebírá ze svarového spoje podélně (obr. 2.3). Takto vyrobená zkušební tyč je tvořena pouze svarovým kovem. [32, 33, 35]



Obr. 2.3 Zkušební těleso pro podélnou zkoušku tahem. [33]

2.4.2. Zkouška rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu slouží k určení nárazové práce K , která je potřebná pro porušení zkušebního tělesa (obr. 2.4). Řadíme ji mezi zkoušky dynamické a řídí se normou ČSN EN ISO 148-1. [46] Principem této zkoušky je přeražení zkušebního tělesa jedním nárazem Charpyho kyvadlového kladiva. Zkušební těleso je uprostřed délky opatřeno v příčném směru vzhledem ke svaru V- nebo U-vrubem definovaných rozměrů. [32, 33, 37, 38]



Obr. 2.4 Typy zkušebních tělesech. [37]

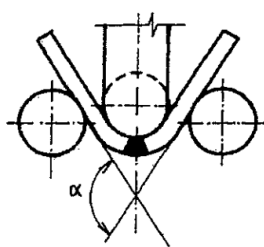
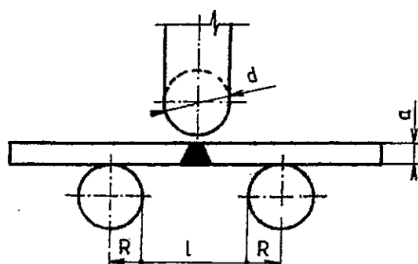
Pro zkoušky rázem v ohybu se většinou odebírají vzorky z předem definovaných míst, a proto se používá značení, které jednoznačně určuje polohu zkušebních těles vzhledem k polotovaru, případně svaru. [32, 33, 37]

2.4.3. Zkouška ohybem

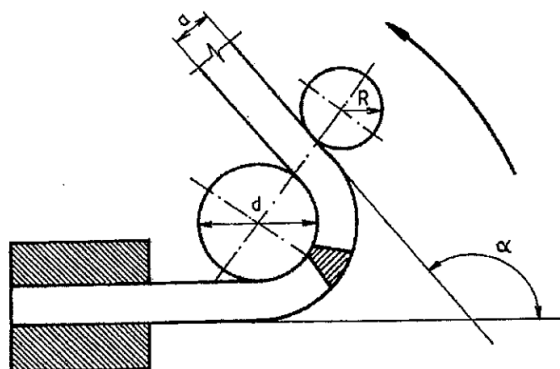
Zkouška ohybem se řídí normou ČSN EN ISO 5173 [40] a patří do skupiny statických mechanických zkoušek. Podobně jako u tahové zkoušky se i zde zkušební tyč odebírá příčně nebo podélně vzhledem ke svarovému spoji. Existují tak dva typy ohybové zkoušky, a to příčná a podélná zkouška ohybem. Zkouška je prováděná za pokojové teploty. Během zkoušky dochází k plastické deformaci jednosměrným ohybem, což způsobuje, že jeden z příčných řezů nebo jeden z povrchů svarového spoje je namáhán tahem. Dle normy ČSN EN ISO 5173 se zkouška provádí buď pomocí ohýbacího trnu, nebo ohýbací kladky.

Během zkoušky ohýbacím trnem je tyč položena na dvou rovnoběžných podpěrných válečcích nebo na přípravku pro řízené ohyby. Ohýbání vzorku musí být způsobeno pomalým

postupným zatěžováním uprostřed rozteče podpor, tj. v ose svaru, zatížením působícím na ohýbací trn (tříbodový ohyb) kolmo na povrch zkušební tyče (obr. 2.5). Schéma uspořádání experimentu s ohýbací kladkou je uvedeno na obr. 2.6.



Obr. 2.5 Příčná zkouška ohýbacím trnem ze strany kořene svaru. [41]

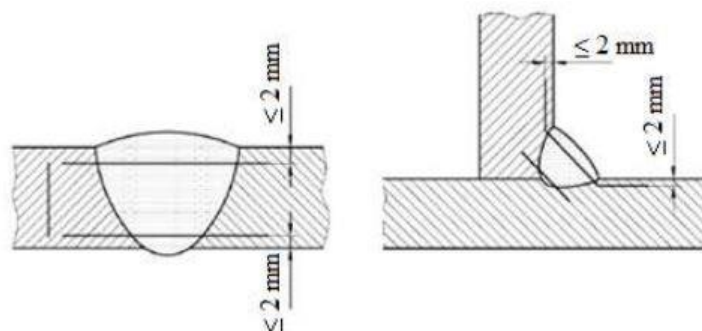


Obr. 2.6 Zkouška ohýbací kladkou. [40]

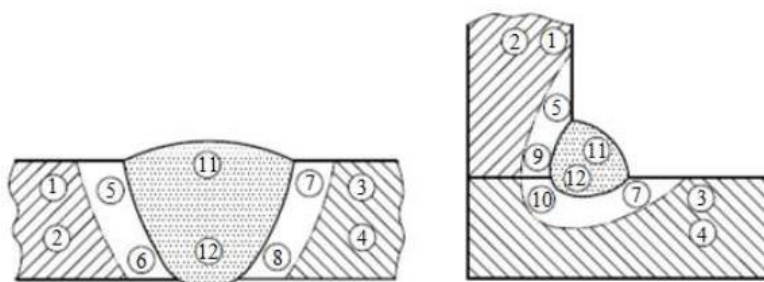
2.4.4. Zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti je další základní destruktivní zkouškou svarových spojů. Účelem této zkoušky je určení nejnižších a nejvyšších hodnot tvrdosti základního materiálu, materiálu v TOO a svarového kovu. Tvrdost materiálu se obecně definuje jako odolnost povrchu tělesa (materiálu) proti statickému nebo dynamickému vnikání cizího tělesa. Pro zkoušení tvrdosti svarů je určena norma ČSN EN ISO 9015-1 [42], v případě měření mikrotvrdosti svarů se řídíme normou ČSN EN ISO 9015-2 [43]. Při zkoušení tvrdosti svarových spojů se obvykle provádí pouze statické zkoušky tvrdosti, především podle Vickerse (ČSN EN ISO 6507-1) [44] nebo Brinella (ČSN EN ISO 6506-1) [45].

Zkoušky tvrdosti svarů jsou buďto označovány písmenem R, kdy je tvrdost určována pomocí řady tisků (obr. 2.7) nebo písmenem E, kdy se jedná o jednotlivé vtisky, viz obr. 2.8. [42, 33]



Obr. 2.7 Měření tvrdosti řadou vtisků. [42]



Obr. 2.8 Příklady oblastí jednotlivých vtisků. [42]

Problémem při zkoušení tvrdosti (mikrotvrdosti) u svarových spojů může být tepelné ovlivnění vzorku při mechanickém řezání, které se provádí ve směru příčném na svarový spoj. Z tohoto důvodu je potřeba věnovat zvýšenou pozornost především dostatečnému chlazení při dělení experimentálního materiálu.

II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3. EXPERIMENT

Pro účely experimentů byly použity polotovary titanové slitiny Ti-6Al-4V (v dalším textu zkráceně Ti64). Z polotovarů byla zhotovena zkušební tělesa jak pro mechanické zkoušky, tak pro strukturní analýzy.

3.1. Materiál, polotovary, geometrie zkušebních těles

3.1.1. Titanová slitina Ti-6Al-4V

Titanová slitina Ti64 patří do skupiny slitin, která obsahuje fázi α i β . Hliník ve struktuře působí jako stabilizátor fáze α a vanad jako stabilizátor fáze β . Jedná se o nejpoužívanější slitinu titanu. Výhodou této slitiny oproti ostatním titanovým slitinám je dobrá tvařitelnost a svařitelnost. Slitina Ti64 vyniká nízkou hustotou, vysokou pevností a dobrou korozní odolností. Díky tomu je stále více využívána v průmyslových odvětvích, jakými jsou např. letecký a kosmický průmysl, stavba lodí, petrochemický a potravinářský průmysl. Problémy vznikající při svařování slitiny Ti64 jsou způsobeny především tím, že při ohřátí materiálu nad 250 °C a hlavně při jeho natavení má velkou tendenci reagovat s plyny, hlavně s vodíkem, kyslíkem a dusíkem, příp. s uhlíkem. Tyto prvky způsobují zkřehnutí slitiny a pokles tažnosti a houževnatosti. Chemické složení slitiny Ti64 je uvedeno v tabulce 3.1. [2, 48]

Tab. 3.1: Chemické složení titanové slitiny Ti-6Al-4V [hm. %]. [18]

C	Fe	N	O	Al	V	H
max. 0,10	max. 0,25	max. 0,05	max. 0,020	5,50 - 6,75	3,50 - 4,50	max. 0,015

Vlastnosti titanové slitiny Ti64 vycházejí především z chemického složení a tepelného zpracování, které bylo použito při výrobě. Pro experiment byly použity polotovary ve stavu po kování a žíhání, sestávajícího se z ohřevu nad transformační teplotu T_{β} a následného pomalého ochlazování). Na obr. 3.1 je uvedena struktura základního materiálu. Jedná se o acikulární morfologii, mikrostruktura je tvořena deskami transformované α fáze (z původních β zrn) a zbytkovou β fází mezi jednotlivými deskami.



Obr. 3.1 Struktura základního materiálu titanové slitiny Ti64.

3.1.2. Polotovary

Pro účely experimentů byly dodány polotovary ve tvaru čtvrtkruhů (obr. 3.2) v základním stavu, tedy po kování a následném žíhání. Značení a rozměry polotovarů jsou uvedeny v tab. 3.2.

Tab. 3.2: Polotovary dodané k experimentu.

Tvar	Počet	Poloměr	Tloušťka	Označení
čtvrtkruh	4	240 mm	25 mm	G1 – G4
čtvrtkruh	16	240 mm	≤ 10 mm	F1.1-F1.4; F2.1-F2.4; E1-E4; H1-H4

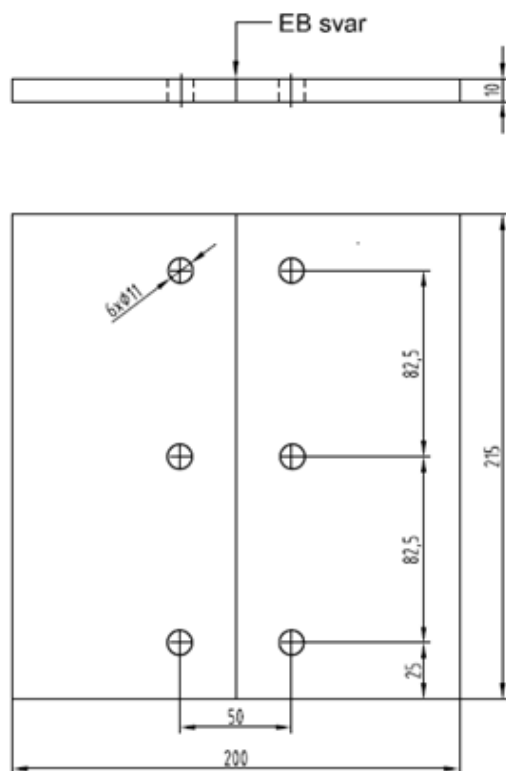


Obr. 3.2 Dodané polotovary slitiny Ti-6Al-4V a jejich označení.

Na obr. 3.3 je uvedeno schéma svařence, ze kterého byla následně vyrobena zkušební tělesa pro hodnocení mechanických vlastností svarových spojů slitiny Ti64 připravených metodou svařování elektronovým svazkem (EBW). Jedná se o dvě desky připevněné ke svařovacímu přípravku (obr. 3.4), které byly následně svařeny technologií EBW. Parametry svařování jsou uvedeny v tab. 3.3, kde nejdůležitějšími parametry jsou U_A (urychlovací napětí), I_b (proud svazku), v_p (rychlost posuvu paprsku).

Tab. 3.3: Parametry svařování EBW

Materiál	U_A [kV]	I_b [mA]	$SURF$ [mA]	$\phi SPOT$ [mm]	v_p [mm/s]	f [Hz]
Ti-6Al-4V	120	25	-4	0,2	20	500



Obr. 3.3 Schéma svařence.

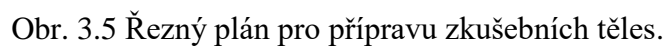


Obr. 3.4 Zkušební deska slitiny Ti64 po svařování, upevněná v přípravku.

3.1.3. Zkušební tělesa

Pro určení základních materiálových vlastností slitiny Ti64 byla vyrobena zkušební tělesa z polotovarů v základním stavu, tj. po kování a žíhání. Zkušební tělesa pro testování svarových spojů byla vyrobena ze svařenců ze stejného materiálu. Na obr. 3.5 a 3.6 jsou uvedeny řezné plány pro výrobu zkušebních těles pro zkoušky tahem a zkoušky rázem v ohybu.

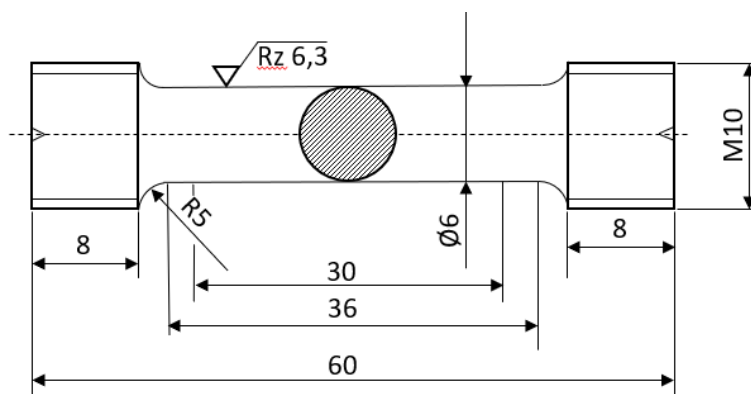
Polotovar, schematicky znázorněný na obr. 3.6 a označený jako „kovadlinka“ simuluje reálný svařenec, konkrétně oběžné kolo kompresoru.



3.2. Zkoušky mechanických vlastností

3.2.1. Zkoušky tahem

Zkoušky tahem byly provedeny za použití poměrných válcových těles, která odpovídala standardu DIN 50125, typ tělesa „B“ [47]. Použitá zkušební tělesa měla nominální průměr 6 mm, počáteční měřenou délku 30 mm a závitové hlavy M10 (viz obr. 3.7). Zkoušky tahem byly provedeny za pokojové teploty a odpovídaly normě ČSN 6892-1 [34].



Obr. 3.7 Zkušební těleso pro zkoušku tahem.

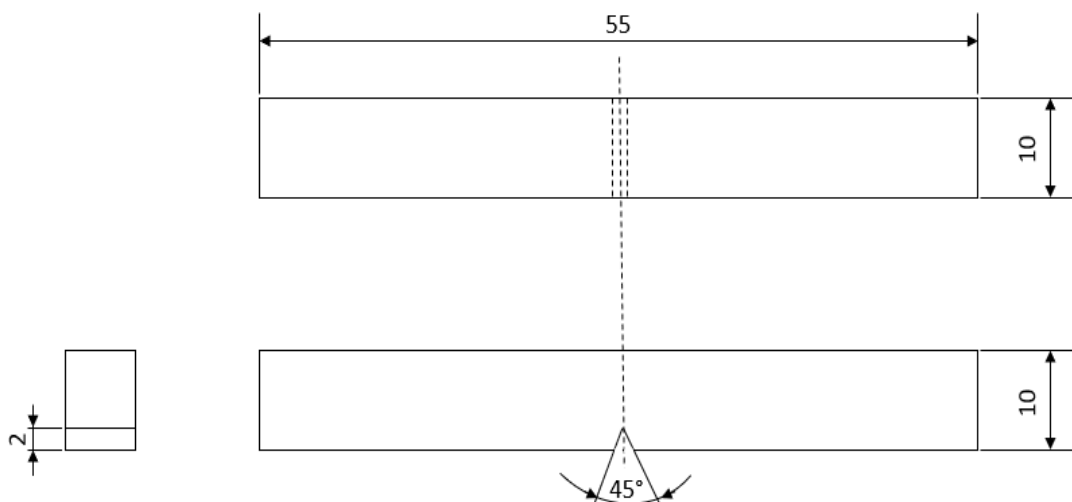
Pro zjištění skutečných výchozích rozměrů byla před zkouškou všechna zkušební tělesa proměřena. Pro realizaci tahových zkoušek byl použit zkušební stroj Zwick Z250 Allround-line tCII, na kterém byl nainstalovaný dynamometr 150 kN. Záznam prodloužení až do lomu byl zajištěn pomocí snímače prodloužení Zwick multiXtens. Pro řízení zkušebního stroje a vyhodnocení zkoušek byl použit software Zwick testXpert II, ver. 3.6. Tentýž software byl použit i pro vyhodnocení zkoušek a analýzu experimentálních dat.

V lineární oblasti tahové křivky, tj. v oblasti elastických deformací a v okolí meze kluzu byla rychlost zatěžování 1,0 mm/min., jinde potom 2,0 mm/min. V přílohách I až III jsou uvedeny zatěžovací křivky všech testovaných zkušebních tyčí.

3.2.2. Zkoušky rázem v ohybu

Pro zkoušky rázem v ohybu bylo použito kyvadlové rázové kladivo Heckert PSd300/150 s počáteční potenciální energií beranu 300 J.

Zkoušky rázem v ohybu byly provedeny v souladu s normou ČSN ISO 148-1 [46]. Této normě také odpovídala použitá standardní zkušební tělesa s nominálními rozměry (10 × 10 × 55) mm, opatřená „V“ vrubem o hloubce 2 mm, úhlu 45° a poloměru kořene vrubu 0,25 mm, viz obr. 3.8. Experimenty byly realizovány při pokojové teplotě podle podmínek zmíněné normy.



Obr. 3.8 Zkušební těleso pro zkoušku rázem v ohybu.

3.2.3. Zkoušky ohybem

Pro zkoušky ohybem byl použit elektromechanický zkušební stroj Zwick Z250 Allround-line tCII, který byl osazen dynamometrem se silovou kapacitou 50 kN, resp. 150 kN. Pro řízení a vyhodnocování zkoušek byl využíván software Zwick testXpert II, ver. 3.6. Průhyb zkušebních těles byl měřen snímačem Zwick multiXtens.

Zkoušky ohybem byly provedeny za pokojové teploty a v souladu s normou ČSN EN ISO 5173 [40] na zkušebních tělesech s nominálními rozměry průřezu (10×17) mm. Parametry zatěžování a zatěžovací křivky jednotlivých zkušebních těles jsou uvedeny v příloze IV.

3.2.4. Měření mikrotvrdosti

Měření mikrotvrdosti metodou dle Vickerse bylo realizováno v souladu s normou ČSN EN ISO 6507-1 [44]. Zkoušky tvrdosti byly provedeny na svarech, připravených technologií EBW s různými parametry svařování. Důvodem použití různých parametrů svařování bylo posouzení, zda změna parametrů výrazně ovlivní výslednou tvrdost svarového spoje. Pro experiment byl použit počítačem řízený mikrotvrdoměr Leco Im247at. Na každém vzorku byla vytvořena řada 40 vtisků HV0,1.

3.3. Výsledky experimentů

3.3.1. Výsledky zkoušek tahem základního materiálu a svarů

Zkouškou tahem byly určeny základní mechanické charakteristiky slitiny Ti64 (tab. 3.4). Mechanické charakteristiky svaru této slitiny jsou uvedeny v tabulkách 3.5 a 3.6.

Tab. 3.4: Základní mechanické charakteristiky titanové slitiny Ti64.

tyč. č.	T [°C]	d_0 [mm]	L_0 [mm]	E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$R_m/R_{p0,2}$ [-]	A_g [%]	A [%]	Z [%]
T01	23	6,010	30,01	122	854	918	1,075	4,6	7,3	16,5
T02	23	6,024	30,00	122	836	873	1,044	3,4	6,1	17,7
T03	23	6,011	29,99	122	816	853	1,045	3,5	7,7	30,4
Střední hodnota				122	835	881	1,055	3,8	7,0	21,5
Směrodatná odchylka				0	19,0	33,3	0,018	0,67	0,83	7,7

Tab. 3.5: Základní mechanické charakteristiky svaru titanové slitiny Ti64.

tyč. č.	T [°C]	d_0 [mm]	L_0 [mm]	E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$R_m/R_{p0,2}$ [-]	A_g [%]	A [%]	Z [%]
S01T	23	6,013	30,00	129	807	864	1,071	4,2	5,6	13,7
S02T	23	6,018	30,00	122	795	857	1,078	4,0	8,2	24,5
S03T	23	6,014	30,01	125	833	882	1,059	3,9	8,2	15,1
Střední hodnota				125	811	867	1,069	4,0	7,3	17,8
Směrodatná odchylka				7,0	19,4	12,9	0,010	0,15	1,50	5,87

Tab. 3.6: Základní mechanické charakteristiky svaru slitiny Ti64 – kovadlinka „Deska 1“.

zkuš. těl.	T [°C]	d_0 [mm]	L_0 [mm]	E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$R_m/R_{p0,2}$ [-]	A_g [%]	A [%]	Z [%]
D1-1	23	6,020	30,00	104	859	909	1,058	3,3	6,7	18,9
D1-2	23	5,980	29,99	112	865	923	1,067	4,5	6,3	21,2
D1-3	23	6,000	30,01	106	844	891	1,056	3,9	6,1	22,4
D1-4	23	6,010	30,00	104	855	915	1,070	4,7	6,9	15,8
D1-5	23	6,010	30,00	113	849	891	1,049	3,9	5,4	6,9
D1-6	23	6,020	30,03	113	846	887	1,048	2,9	5,1	8,5
D1-7	23	6,000	30,01	104	850	903	1,062	3,7	6,1	13,6
D1-8	23	6,010	30,00	105	823	860	1,045	2,7	8,7	30,8
Střední hodnota				108	849	897	1,056	3,7	6,4	17,3
Směrodatná odchylka				4,2	12,6	19,7	0,010	0,71	1,10	7,82

Legenda pro Tab. 3.4 až 3.6

T	[°C]	teplota zkoušky
d_0	[mm]	počáteční průměr zkoušené délky zkušebního tělesa
L_0	[mm]	počáteční měřená délka
E	[GPa]	modul pružnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
R_m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
$R_m/R_{p0,2}$	[-]	míra deformačního zpevnění
A_g	[%]	plastické prodloužení při maximálním zatížení (F_m)
A	[%]	tažnost
Z	[%]	kontrakce

3.3.2. Výsledky zkoušek rázem v ohybu základního materiálu a svarů

Veškeré zkoušky rázem v ohybu byly provedeny při pokojové teplotě. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulce 3.7 (základní materiál) a v tabulkách 3.8 a 3.9 (svarový spoj). Z důvodu menší tloušťky polotovaru byly zkoušky realizovány na tyčích zmenšené tloušťky.

Tab. 3.7: Výsledky zkoušek rázem v ohybu titanové slitiny Ti64.

Vz. č.	T [°C]	KV [J]
T11	20	24,0
T12	20	27,1
Střední hodnota		25,6

Tab. 3.8: Výsledky zkoušek rázem v ohybu svaru titanové slitiny Ti64.

Vz. č.	T [°C]	KV [J]
Ti1	20	17,9
Ti2	20	18,7
Střední hodnota		18,3

Tab. 3.9: Výsledky zkoušek rázem v ohybu svaru slitiny Ti64 – kovadlinka „Deska 1“.

zkuš. těleso	T [°C]	KV [J]
1	23	17,2
2	23	17,4
3	23	17,1
4	23	17,4
5	23	19,1
6	23	19,0
7	23	21,0
8	23	18,1
Střední hodnota		18,3
Směrodatná odchylka		1,35

Legenda pro Tab. 3.7 až 3.9

T	[°C]	teplota zkoušky
KV	[J]	nárazová práce

3.3.3. Výsledky ohybových zkoušek

Ohybové zkoušky byly realizovány za účelem posoudit deformační schopnost slitiny Ti64 obsahující svarový spoj. Nebyly hodnoceny pouze napět'ové charakteristiky, ale také vzhled povrchu zkušebních těles na tahové straně tělesa v místě maximálního průhybu po provedení zkoušky. Z fotografie 3.9 je patrné, že všechna tělesa obsahují v místě svaru defekty typu trhlin. V tabulce 3.10 jsou sumarizovány napět'ové charakteristiky.

Tab. 3.10: Výsledky ohybových zkoušek svaru slitiny Ti64 – kovadlinka „Deska 1“.

zkuš. těleso	T [°C]	span [mm]	a_0 [mm]	b_0 [mm]	$R_{p0.2}$ [MPa]	F_{\max} [N]	σ_M [MPa]	pozn.
1	23	43	5,15	16,88	1668	14461	2083	lom ve svaru
2	23	43	5,15	16,87	1622	14566	2100	lom ze svaru do ZM
3	23	43	5,16	16,87	1703	14326	2057	lom ze svaru do ZM
4	23	43	5,10	16,85	1708	13590	2000	lom ve svaru
Střední hodnota					1675	14235	2060	
Směrodatná odchylka					39,7	441,6	43,7	

Legenda pro Tab. 3.10

T	[°C]	teplota zkoušky
span	[mm]	vzdálenost podpor
a_0, b_0	[mm]	počáteční výška a šířka zkušebního tělesa
$R_{p0.2}$	[MPa]	mez kluzu v ohybu
F_{\max}	[N]	maximální síla
σ_M	[MPa]	mez pevnosti v ohybu



Obr. 3.9 Svařená ohybová tělesa ze slitiny Ti 64 po provedené ohybové zkoušce („Deska 1“).

3.3.4. Výsledky měření mikrotvrdomosti

Tabulka 3.11 obsahuje průměrné hodnoty tvrdosti, získané ze 40 provedených vtisků na jednotlivých vzorcích. V obrázcích 3.10 až 3.20 jsou uvedeny grafické závislosti úrovně tvrdosti na poloze pro vybrané vzorky. Vzorky R-6 až R-9 (tab. 3.11) byly vyrobeny ze svařence, který vznikl svařením dvou destiček uchycených ve svařovacím přípravku vedle sebe. Vzorky označené L1 až L12 byly připraveny ze svařence, který byl vyroben svařením dvou destiček umístěných nad sebou. Došlo k provaření horní destičky skrze celou tloušťku, elektronový svazek pronikl do destičky umístěné pod ní, čímž následně došlo k samotnému svaření.

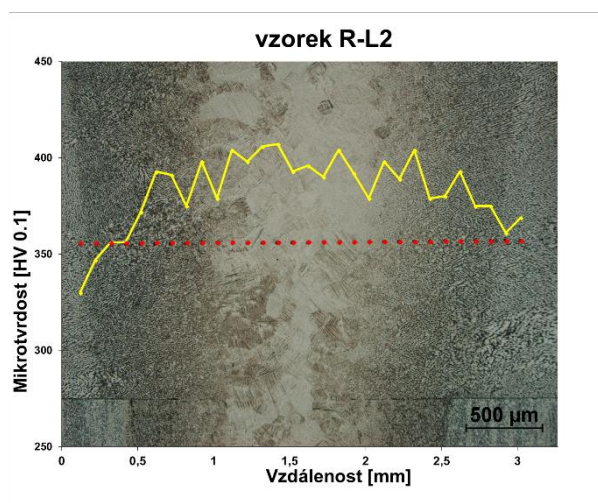
Naměřené hodnoty mikrotvrdomosti mají u všech vzorků velmi podobné hodnoty. Z fotografií na obr. 3.10 a) až j) je zřejmé, že tvrdost je nejmenší v základním materiálu a stoupá ve směru do svarového kovu. Jelikož lze tento průběh pozorovat u všech vzorků, můžeme konstatovat, že parametry svařování nemají vliv na výslednou tvrdost svarového spoje.

Tab. 3.11: Hodnoty mikrotvrdomosti napříč svarem slitiny Ti64.

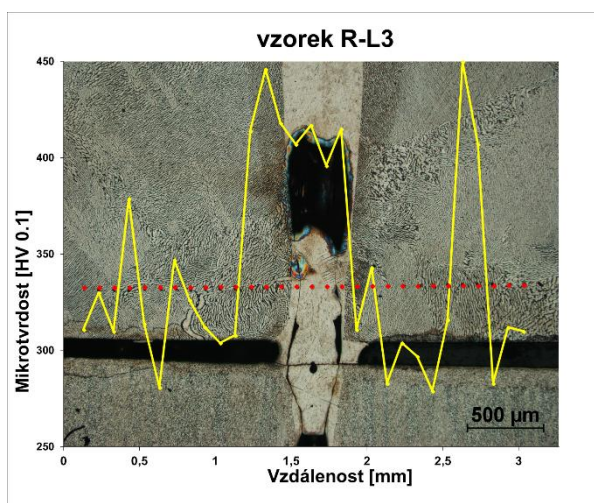
Vzorek	Tvrdost HV 0,1	
	(střední hodnota a směrodatná odchylka)	
R-6	405 ± 11,1	
R-7	401 ± 45,4	
R-8	379 ± 28,8	
R-9	389 ± 13,9	
R-L1	359 ± 37,4	
R-L2	383 ± 18,9	

Tab. 3.11, pokračování

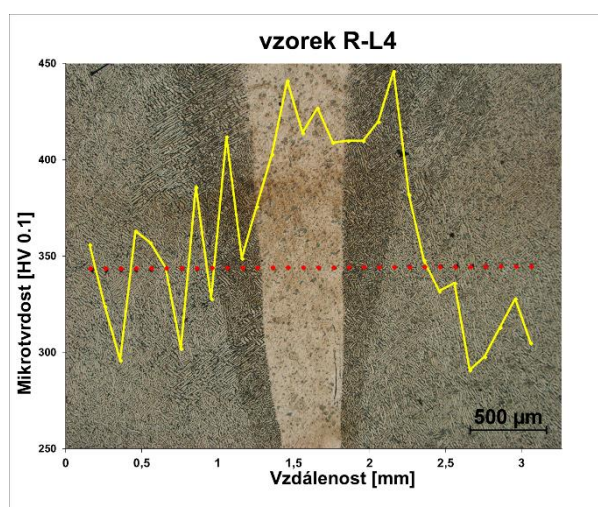
R-L3	$344 \pm 54,2$
R-L4	$364 \pm 47,2$
R-L5	$359 \pm 32,1$
R-L6	$323 \pm 30,3$
R-L7	$353 \pm 39,0$
R-L8	$382 \pm 19,3$
R-L9	$392 \pm 30,5$
R-L10	$376 \pm 29,7$
R-L11	$346 \pm 21,9$
R-L12	$370 \pm 22,9$



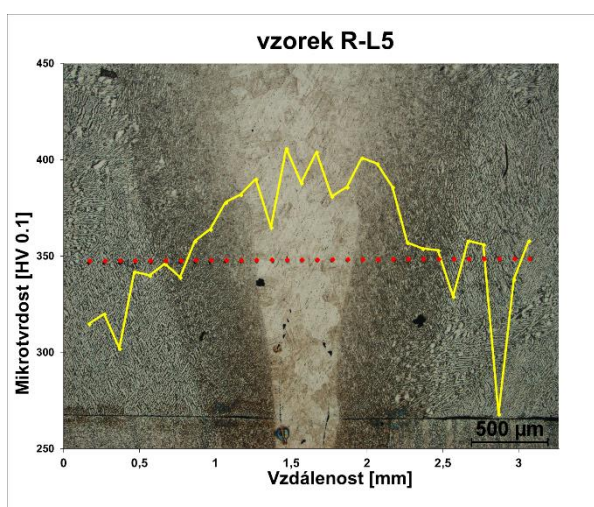
a)



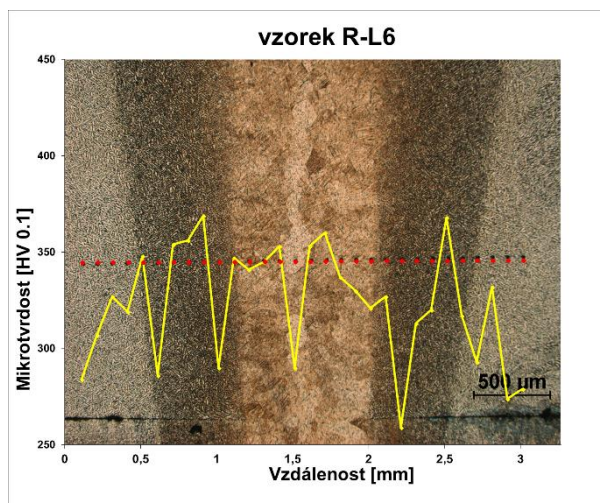
b)



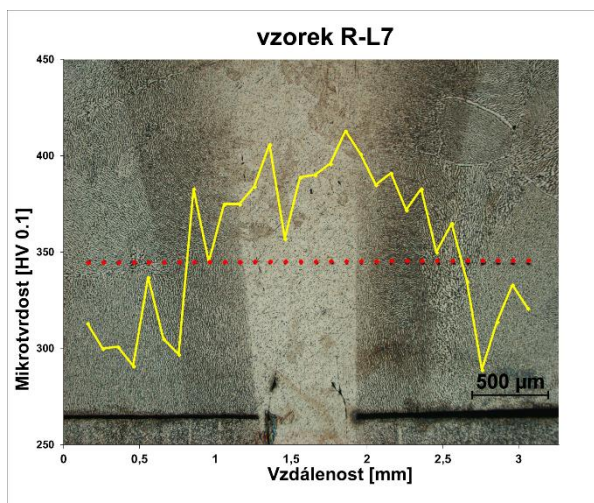
c)



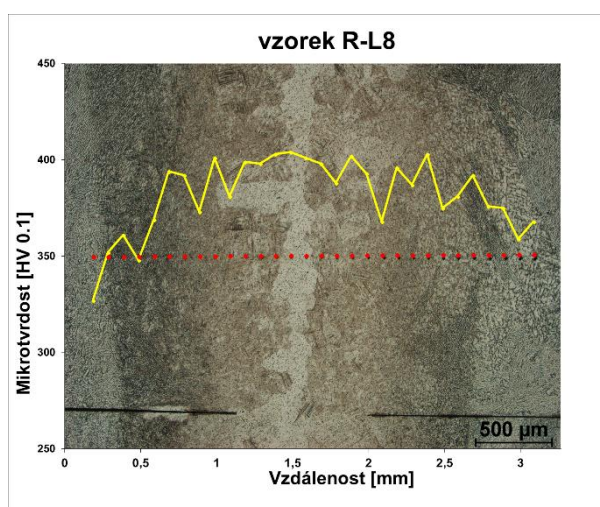
d)



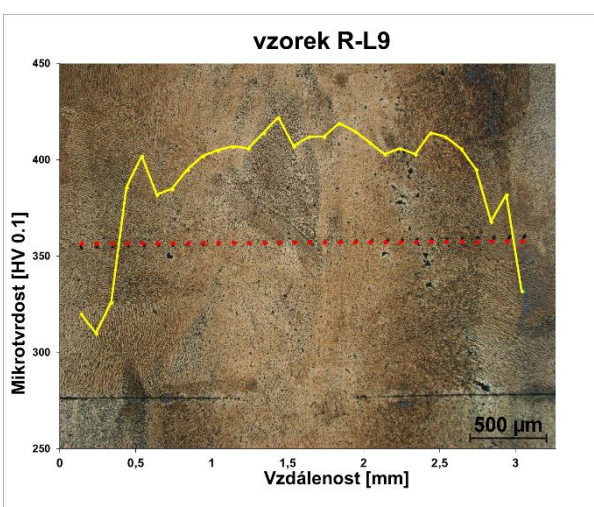
e)



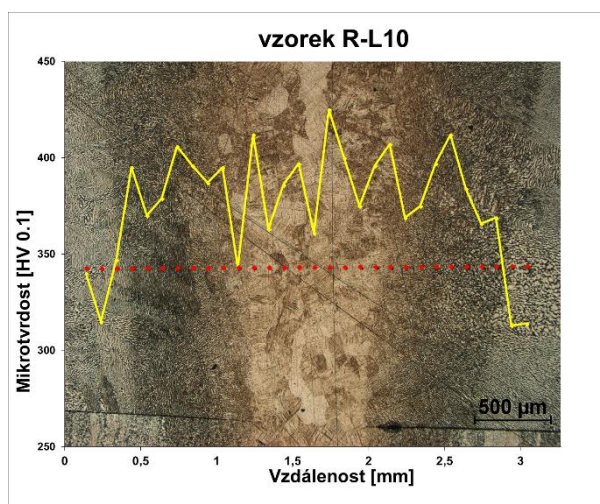
f)



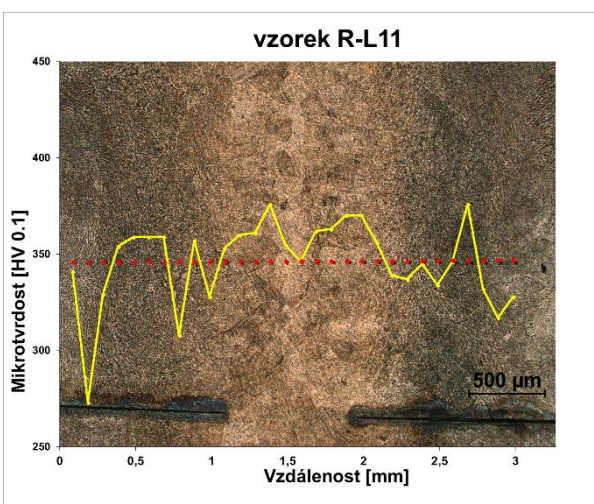
g)



h)



i)

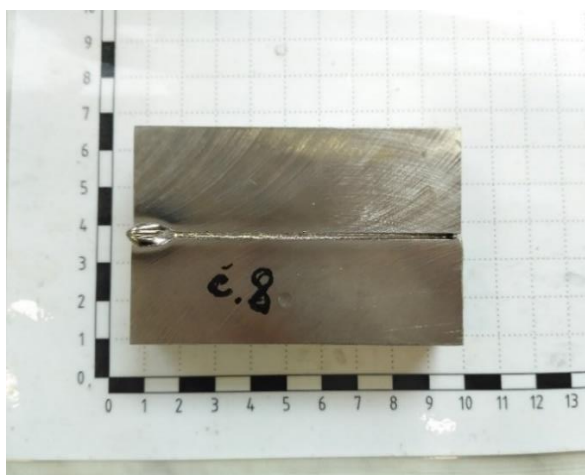


j)

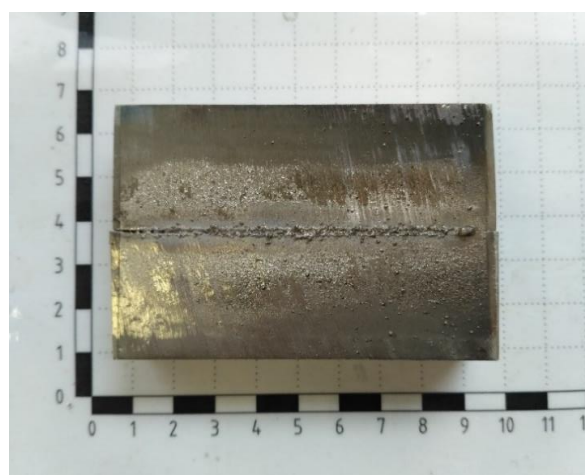
Obr. 3.10 Průběh mikrotvrdosti na jednotlivých vzorcích.

3.3.5. Metalografická analýza

Metalografickou analýzou byla posuzována případná přítomnost nežádoucích strukturních složek. Takové strukturní složky nebyly zjištěny a z analýzy vyplývá, že procesní parametry svařování elektronovým paprskem neměly vliv na výslednou mikrostrukturu svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Na metalografických výbrusech můžeme pozorovat rozdíly v šířce pásu, který je tvořen svarovým kovem a tepelně ovlivněnou oblastí. U některých vzorků došlo k vytvoření bublin a trhlin ve svarovém kovu. Makroskopické snímky svaru jsou uvedeny na obrázku 3.11.



a) hlava svaru



b) kořen svaru

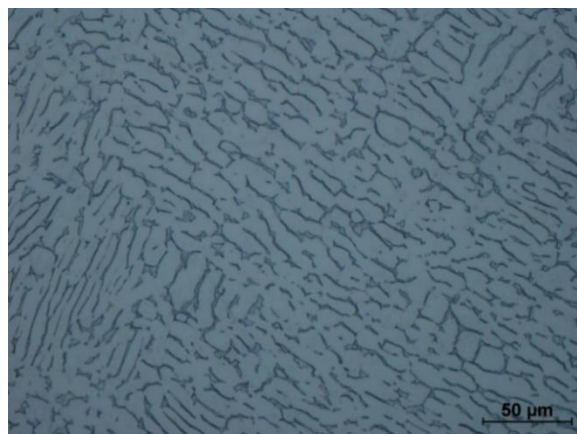
Obr. 3.11 Makrosnímky svaru.

Vzorky pro metalografickou analýzu byly připravovány standardním postupem, spočívajícím v dělení materiálu, zalisování za tepla do zalévací hmoty, broušení, leštění a následného leptání. Během dělení materiálu bylo prováděno velmi intenzivní chlazení, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění plochy řezu. Po zalisování následovalo broušení s vodním chlazením brusnými papíry o zrnitosti 120 až 2000. Doba broušení na jednotlivých papírech byla cca 4 minuty. Leštění bylo provedeno na leštících plátnech s přidavkem diamantové pasty o zrnitosti 3 μm a 1 μm po dobu 4 minut, během čehož docházelo ke smáčení leštícího plátna ethanolem. Pro zvýraznění mikrostruktury byly vzorky leptány po dobu 10 sekund leptadlem Kroll I. Pro hodnocení mikrostruktury byl použit světelný mikroskop typu Olympus GX51.

Mikrostruktura základního materiálu slitiny Ti64 má acikulární morfologii a je tvořena deskami α fáze transformované z původních β zrn a zbytkovou β fází mezi jednotlivými deskami. Příklady mikrostruktury základního materiálu jsou uvedeny na obr. 3.12.



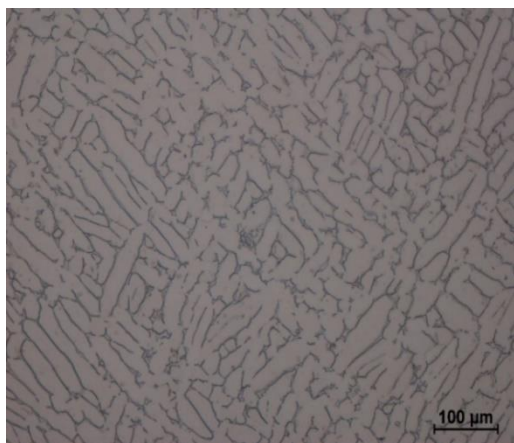
a) zvětšeno 100 krát



b) zvětšeno 200 krát

Obr. 3.12 Struktura základního materiálu.

Součástí strukturní analýzy bylo posouzení homogenity základního materiálu. Z tohoto důvodu byly zhotoveny a analyzovány metalografické výbrusy ve třech vzájemně kolmých směrech vzhledem ke směru tváření. Z analýzy (obr. 3.13a – 3.13c) vyplynulo, že mikrostruktura základního materiálu je ve všech směrech stejná a nejeví výrazné známky anizotropie.



a) směr X



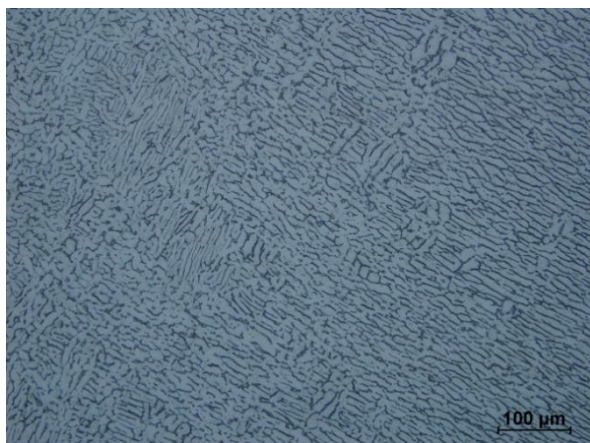
b) směr Y



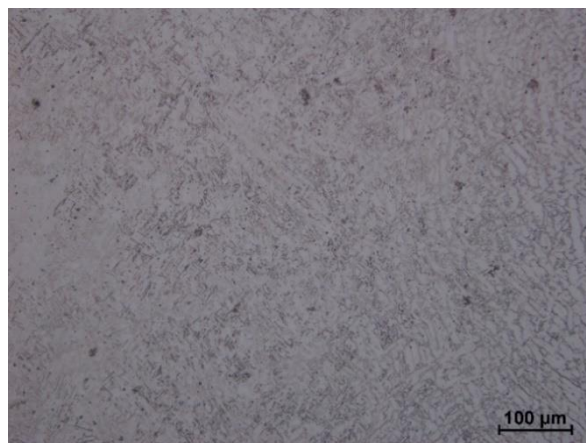
c) směr Z

Obr. 3.13 Struktura základního materiálu v různých směrech.

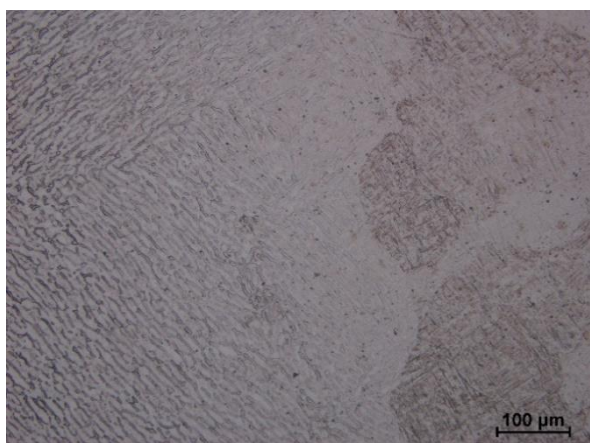
Svarový kov je tvořen čistě martenzitickou strukturou, která je tvořena α' fází. Fáze α' vzniká při rychlém ochlazení svaru z fáze β . U linie ztavení je patrné rozpuštění zbytkové β fáze. Na tuto oblast dále navazuje oblast tvořená martenzitickou α' fází obklopenou nerozpuštěnou zbytkovou β fází. Na obr. 3.14 jsou uvedeny příklady mikrostruktur slitiny Ti64 v jednotlivých oblastech svarového spoje.



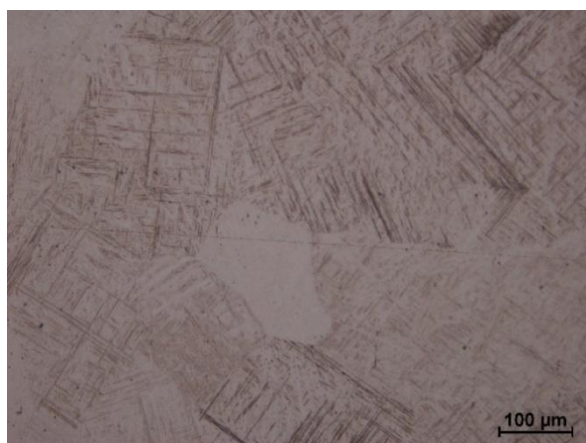
a) základní materiál



b) základní mat./TOO



c) TOO/svarový kov



d) svarový kov

Obr. 3.14 Mikrostruktura v jednotlivých oblastech svarového spoje.

4. DISKUZE VÝSLEDKŮ

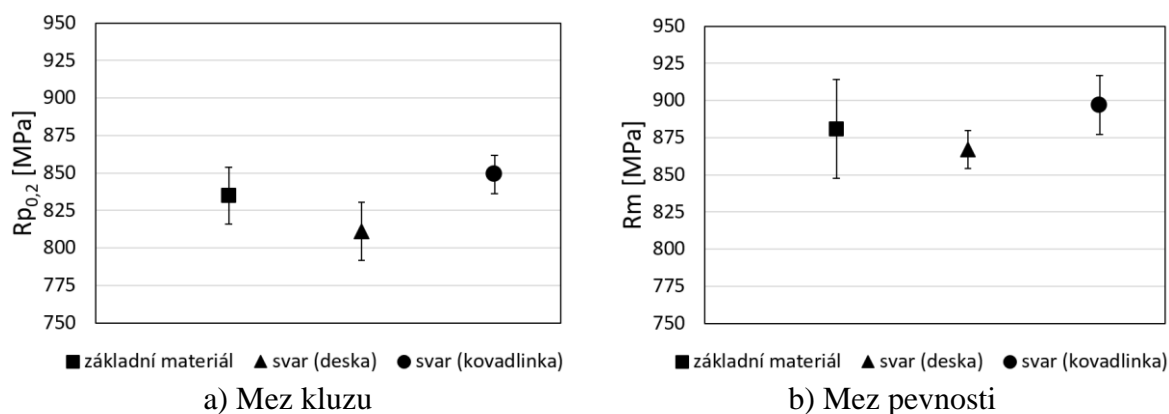
Metalografické preparáty a zkušební tělesa, použita pro účely experimentů, byla připravena z dodaných polotovarů, které se nacházely ve stavu po rozpouštěcím žíhání a kování. Žíhání bylo provedeno ohřevem nad transformační teplotu T_β s následným pomalým ochlazením. Takovéto tepelné zpracování vedlo ke vzniku acikulární morfologie základního materiálu, jehož mikrostruktura je tvořena deskami transformované α fáze (z původních β zrn) a zbytkovou β fází mezi jednotlivými deskami (obr. 3.12). Během svařování experimentálního materiálu elektronovým svazkem došlo k lokálnímu překročení solidifikační teploty a následnému rychlému ochlazení. Vznikl tak teplotní gradient, který měl za následek nukleaci a rozvoj jednotlivých oblastí svaru. Z tohoto důvodu můžeme pozorovat rozdílnou mikrostrukturu základního materiálu a svarového kovu, resp. tepelně ovlivněné oblasti (obr. 3.14). Pozorované struktury, viz dále, se shodují se závěry v dostupné literatuře, např. [48].

Teple vznikající při svařování způsobí zahřátí základního materiálu nad transformační teplotu T_β , slitina se velmi rychle taví a odpařuje, vyplňuje prostor v „key hole“ a následně při rychlém ochlazení dochází k martenzitické transformaci z vysokoteplotní β fáze na fázi α' , která tvoří vzniklý svarový kov (obr. 3.14 d). Krystalizační zárodky fáze α' vznikají na hranicích fáze β i v objemu fáze β zároveň. Dochází také ke vzniku sekundární fáze α' , která se formuje z původní fáze α' koncentrující se v oblasti svaru. Během svařování slitiny TiAl6V4 je fázová přeměna svarového kovu poměrně složitá. Při zahřívání se původní fáze β ihned transformuje na vysokoteplotní fázi β z důvodu teplotního šoku, způsobeného elektronovým paprskem. Ve stejném okamžiku dochází k transformaci původní fáze α na vysokoteplotní fázi β . Tato difúzní transformace předchází následující martenzitické reakci. Transformace vysokoteplotní β fáze na fázi α' probíhá pomocí difúze nebo smykem, případně oběma mechanismy během procesu chladnutí. Jakmile dojde ke snížení teploty na teplotu solidu, primární fáze α' nukleuje připojením k hranici zrn, která se nacházejí na rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a vznikajícího svarového kovu a vytvářejí sloupcové krystaly, rostoucí směrem do svarového kovu. Sloupcové krystaly při jejich růstu procházejí skrze zrna β fáze a rozdělují je, přičemž dochází k jejich formování do tvaru označovaného jako laťky a k epitaxiální solidifikaci. Rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu je zobrazeno na obr. 3.14 c. Během svařování s relativně krátkodobým působením velmi vysokých teplot a rychlým ochlazením tavné lázně dochází ke vzniku poměrně jemných zrn, která přispívají k tomu, že pevnost svařovaných spojů je srovnatelná s pevností základního materiálu.

Měřením mikrotvrdosti napříč svarem byly získány hodnoty tvrdosti v základním materiálu, v tepelně ovlivněné oblasti a ve svarovém kovu. Průběhy mikrotvrdostí napříč svarem (obr. 3.10) odpovídají výsledkům dohledatelným v dostupné literatuře. Hodnota tvrdosti slitiny Ti64 by se měla dle materiálového listu pohybovat v intervalu od 340 až 380 HV. Zjištěné průměrné hodnoty mikrotvrdosti v jednotlivých oblastech svarového spoje byly 348 HV_{0,1} (základní materiál), 378 HV_{0,1} (TOO), 415 HV_{0,1} (svarový kov). Hodnoty mikrotvrdosti rostou směrem do svarového kovu. Fakt, že mikrotvrdost v TOO a svarovém kovu je vyšší, než v základním materiálu je přisuzován větší hustotě martenzitu v těchto oblastech svaru. [49]

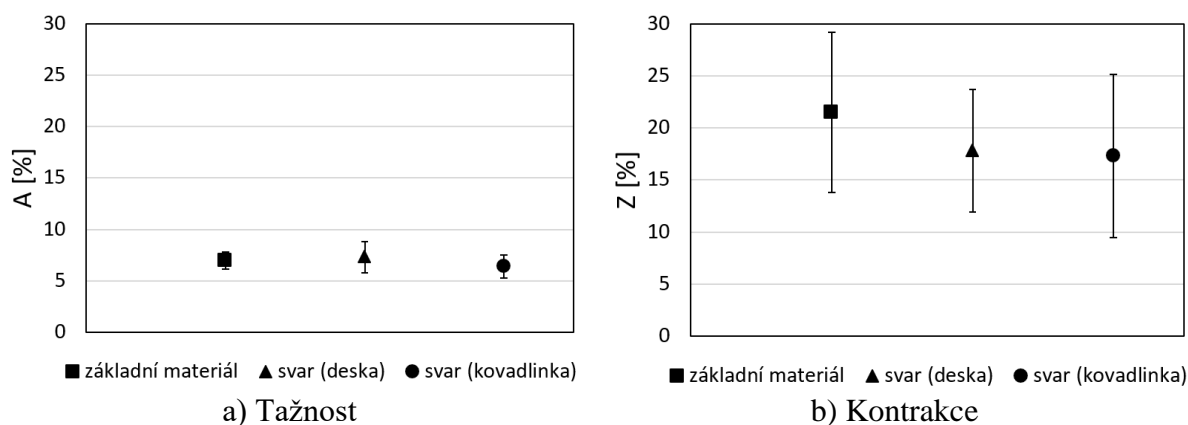
Mechanické vlastnosti slitiny Ti64 byly hodnoceny na základě zkoušek tahem, zkoušek rázem v ohybu a ohybových zkoušek. Zkoušky tahem a zkoušky rázem v ohybu byly provedeny nejprve na zkušebních tělesech tvořených pouze základním materiálem. Následně byly získané hodnoty porovnány s výsledky zkoušek na zkušebních tělesech obsahujících svarový spoj. Dle materiálového listu je minimální mez kluzu slitiny Ti64 $R_{p0,2} = 820$ MPa a jako minimum meze pevnosti je udávána hodnota $R_m = 890$ MPa. Co se týče základního

materiálu, průměrné hodnoty meze kluzu a meze pevnosti odpovídají minimálním hodnotám uvedeným v materiálových listech. V případě zkoušení svarů (zkušební tělesa odebraná z kovadlinky) průměrné hodnoty meze kluzu a meze pevnosti dosáhly větších hodnot než základní materiál. Zkušební tělesa, která byla odebrána z desky, vykazovala nižší hodnoty meze kluzu a meze pevnosti, viz obr. 4.1.



Obr. 4.1 Průměrné hodnoty napěťových charakteristik.

Z výsledků tažnosti a kontrakce vyplývá, že plasticita základního materiálu je lepší než v případě svarového kovu a TOO, viz obr. 4.2. Tyto výsledky jsou v souladu s výsledky, dohledatelnými v literatuře, viz např. [48]. Snížení deformačních charakteristik je zapříčiněno vznikem strukturního rozhraní napříč svarem a podstatnou roli hraje zhrubnutí zrna ve svarovém kovu. Strukturní rozhraní vzniklé metodou EBW je ovšem, ve srovnání s konvenčními metodami svařování, značně lokalizováno.



Obr. 4.2 Průměrné hodnoty deformačních charakteristik.

Zkoušky rázem v ohybu byly realizovány za účelem posouzení odolnosti titanové slitiny Ti64 vůči dynamickému zatěžování. Testován byl jak základní materiál, tak i materiál (tělesa), obsahující svarový spoj. Hodnoty nárazové práce v případě základního materiálu se pohybují okolo 25 J, zatímco hodnoty nárazové práce svarů jsou v průměru 18 J. Jedná se o značný pokles (28 %), avšak hodnota nárazové práce udávána pro slitinu Ti64 výrobcem je 17 J.

Ohybové zkoušky byly realizovány za účelem posouzení deformačních schopností slitiny Ti64 obsahující svarový spoj. Nebyly hodnoceny pouze napěťové charakteristiky, ale také vzhled povrchu zkušebních těles na tahové straně tělesa v místě maximálního průhybu po provedené zkoušce. Z fotografie 3.9 je patrné, že všechna tělesa obsahují v místě svaru defekty typu trhlin. Z tohoto důvodu zvolené parametry svařování konkrétně uvedených zkoušených těles nejsou pravděpodobně nejvhodnější a je zapotřebí optimalizovat je tak, aby nedocházelo ke vzniku trhlin ve svarovém kovu.

ZÁVĚR

Diplomová práce byla vypracována v rámci řešení projektu MPO TRIO, jehož cílem bylo, mimo jiné, posoudit vhodnost použití technologie svařování elektronovým paprskem ke svařování oběžných kol kompresorů, vyrobených z titanové slitiny Ti-6Al-4V. Diplomová práce byla zaměřena na posouzení mechanických vlastností a lomového chování jak základního materiálu, tak svarů titanové slitiny Ti6Al4V připraveného pomocí uvedené technologie.

Teoretická část práce se zabývá problematikou svařování titanových slitin svazkem elektronů, hodnocením svařitelnosti titanových slitin, vlivem svařování elektronovým svazkem na mikrostrukturu a metodami zkoušení svarových spojů.

Experimentální část diplomové práce zahrnuje informace, týkající se základního popisu použitého materiálu a procesu zhotovování zkušebních těles z dodaných polotovarů včetně parametrů svařování elektronovým svazkem. Analýza chemického složení a volba parametrů svařování předcházela této etapě projektu. Cílem experimentální části práce bylo především vyhodnocení mechanických vlastností svarů slitiny Ti-6Al-4V a porovnání těchto vlastností s vlastnostmi základního materiálu, to vše na základě mechanických zkoušek a strukturních analýz, sloužících k posouzení vlivu technologie EBW na výslednou mikrostrukturu slitiny.

Byly diskutovány výsledky mechanických zkoušek a strukturní analýzy titanové slitiny Ti-6Al-4V. Z doposud dostupných výsledků měření mechanických vlastností lze usuzovat na dobrou odolnost svarových spojů vůči mechanickému namáhání s výjimkou statického ohybového namáhání (zkoušky lámavosti), kdy během ohybových zkoušek došlo ke vzniku trhlin na straně zkušebních těles namáhané tahovým napětím. Z tohoto důvodu bude zapotřebí optimalizovat parametry svařování tak, aby ke vzniku trhlin nedocházelo. Na základě hodnocení mikrostruktury lze konstatovat, že základní materiál je homogenní a nevykazuje známky výrazné anizotropie. Rovněž tak nebyly pozorovány výraznější strukturní defekty, za jejich příčinu by bylo možné označit použitou metodu svařování.

Na základě výsledků experimentů a diskuze lze metodu EBW obecně označit za vhodnou pro svařování titanové slitiny Ti-6Al-4V. Hlavní výhodou metody svařování elektronovým svazkem oproti konvenčním metodám svařování je existence mnohem menší tepelně ovlivněné oblasti v bezprostředním okolí svarového spoje se všemi důsledky z toho vyplývajících.

LITERATURA

- [1] AMBROŽ, O, B. KANDUS, J. KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení*. Recenzent Václav Minařík. 1. vyd. Ostrava: Česká svářečská společnost ANB, ZEROSS – svářečské nakladatelství, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
- [2] Ti6Al4V Titanium Alloy. *Arcam AB* [online]. 2018 [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-Titanium-Alloy.pdf>
- [3] HRIVŇÁK, I. *Zváranie a zvariteľ'nosť materiálov*. 1. vyd. Bratislava: Nakladateľství STU, 2009. 492 s. ISBN 978-80-227-3167-6
- [4] VOLKER, A., U. CLAUß, D. DONEBECK, T. KRUSSEL, T. LOWER. *Elektron Beam Welding, The fundamentals of fascinating technology*. pro-beam AG & CO. KGaA, www.pro-beam.com, První vydání, 2011.
- [5] KOUKAL, J., D. SCHWARZ, J. HAJDÍK, *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vyd. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o. Ostrava, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5
- [6] BALEJ Z., V. KUDĚLKA, J. OPLETAL, *Učebnice pro základní kurz svařování*. 2. vyd. Ostrava: ZEROSS – svářečské nakladatelství, 2009. 160 s. ISBN 80-866698-12-2
- [7] KŘÍŽ, R. *Strojírenská příručka 8. svazek: V-Tváření, W-Výrobky se slinovaných prášků, X-Výrobky z plastů, Z-Svařování součástí, Z-Protikorozní ochrana materiálu*. 1. vyd. Praha: Scientia, 1998, 255 s. ISBN 80-718-3054-2.
- [8] SVÁŘEČKY-ELEKTRODY. *Svařování TIG*. In: Google [online]. [Cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-39/t-120>
- [9] *TIG svařování i – základní principy*. [online]. [Cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2008011702>
- [10] *Svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře MIG/MAG*. [online]. [Cit. 2018-02-27] Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=33457&revision=-1&instance=2>
- [11] *An introduction to MIG welding*. [online]. [Cit. 2018-02-27] Dostupné z: www.weldability.com
- [12] KUBÍČEK, J. *Technologie II. – svařování: sylabus díly 1* [online]. Brno, 2006 [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory.htm>
- [13] KOUTNÝ, J. *Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování*. [online]. [Cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/storage/hlinik.pdf>
- [14] SCHULTZ, H. *Electron beam welding*. Cambridge: Abington; Woodhead, 1993, 232s.: ISBN 1-85573-050-2.
- [15] BAUER, B., M. BUŠIĆ, *High energy density welding processes*. Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. 9s. [online]. [Cit. 2018-03-18] Dostupné z: <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-171-06-00.pdf>

- [16] SKALKA, J. *Svařování Ti 6Al 4V elektronovým svazkem*. Brno, 2016. 62s, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D..
- [17] DUPÁK, L. *Mikroobrábění nekovových materiálů elektronovým svazkem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. s. 101. Vedoucí disertační práce prof. RNDr. Bohumila Lencová, CSc.
- [18] BYRTUS, R. *Materiály používané ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc a jejich charakteristiky ve vztahu na výrobní procesy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství, 2016. 47 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc..
- [19] MRŇA, L. *Svařování svazkem elektronů*. Ústav strojírenské technologie [online]. ©2005 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_svazkem_elektronu_2013__mrna.pdf
- [20] Základní informace o svařování elektronovým svazkem. *Ústav přístrojové techniky AV ČR* [online]. ©2014 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <http://ebt.isibrno.cz/zakladni-informace-o-svarovani-elektronovym-svazkem>
- [21] KRUMEICH, F. *Properties of Electrons, their Interactions with Matter and Applications in Electron Microscopy*. Laboratory of Inorganic Chemistry, ETH Zurich. 24s. [online]. Dostupné z: <http://www.microscopy.ethz.ch/downloads/Interactions.pdf>
- [22] *Electron beam welding proces – equipments, working principle with diagram*. [online]. [Cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <http://www.theweldingmaster.com/electron-beam-welding-process/>
- [23] VILACA, P. *Electron Beam Welding (EBW)*. Finsko: Aalto University, 2015. 28 s. [online]. [Cit.2018-03-26]. Dostupné z: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/142852/mod_resource/content/1/ElectronBeamWelding_en_full.pdf
- [24] HOFFMAN Dorothy M., B. SINGH, H. J. THOMAS III, *Handbook of vakuum science and technology*. USA, 1998, 861 s. ISBN 0-12-352065-7
- [25] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN: 80-7204-283-1
- [26] *Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I: Hodnocení kvality svarového spoje*. ČVUT, Praha. [online] [Cit. 2018-03-27]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84906
- [27] BARTÁK, Jiří. *Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení*. Praha: Česká svářečská společnost ANB, 2012, [online], [Cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
- [28] ČSN EN ISO 6520-1: *Svařování a příbuzné procesy – Klasifikace geometrických vad kovových materiálů – Část 1: Tavné svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1998
- [29] ČSN EN ISO 6520-2: *Svařování a příbuzné procesy – Klasifikace geometrických vad kovových materiálů – Část 2: Tlakové svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1998

- [30] ČSN EN 12 062: *Nedestruktivní zkoušení svarů. Obecná pravidla pro kovové materiály*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1998
- [31] FRISCHHERZ, A., P. SKOP. *Technologie zpracování kovů*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1996. ISBN 80-902110-0-3.
- [32] FOLDYNA, V. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 1999, 296 s. Svařování. ISBN 80857-7163-2.
- [33] PODHORA, J. *Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů*. Brno: TDS Brno – SMS, s.r.o., 2005. ISBN 80-903386-4-X.
- [34] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: ÚNMZ, 2010. Třídící znak 42 0310.
- [35] ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Příčná zkouška tahem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 16 s.
- [36] MESSLER, Robert W. *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. New York, USA: John Wiley & Sons, 1999, 662 s. ISBN 04-712-5376-6.
- [37] ČSN EN ISO 9016. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Zkouška rázem v ohybu – umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 12 s.
- [38] SKÁLOVÁ, J, R. KOVAŘÍK, V. BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 2000, 175 s. ISBN 80708-2623-1.
- [39] VĚCHET, S.. *Mechanické vlastnosti a charakteristiky materiálů I*. [online], [Cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/bum/prednasky/07-BUM%20-%20mechanicke%20vlastnosti%201.pdf>
- [40] ČSN EN ISO 5173. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Zkouška ohybem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 24 s.
- [41] KOLAŘÍK, L., *Destruktivní a nedestruktivní zkoušky svarových spojů*, Praha: Ústav strojírenské technologie, ČVUT, [online] [Cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/Svaritelnost.pdf>
- [42] ČSN EN ISO 9015-1. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Zkoušení tvrdosti – Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 20 s
- [43] ČSN EN ISO 9015-2. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Zkouška tvrdosti – Část 2: Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 20 s
- [44] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006, 24 s
- [45] ČSN EN ISO 6506-1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Brinella – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015, 20 s
- [46] ČSN ISO 148-1. *Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy – Část 1: Zkušební metoda* (2010) Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 28 s

- [47] DIN 50125. Testing of metallic materials – Tensile test pieces (2009).
- [48] WANG S., WU X., *Investigation on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy joints with electron beam welding*. Nanjing, College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. 2011. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.11.068
- [49] WEI LU, YAOWU SHI, YONGPING LEI, XIAOYAN LI. *Effect of electron beam welding on the microstructure and mechanical properties of thick TC4-DT alloy*. Peking: Beijing University of Technology, 2011. DOI:10.1016/j.matdes.2011.09.004

SEZNAM SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Význam
a_0	[mm]	počáteční výška zkušební tělesa
A	[%]	tažnost
A_g	[%]	plastické prodloužení při maximálním zatížení (F_m)
b_0	[mm]	počáteční šířka zkušební tělesa
B	[mm]	tloušťka tělesa
\vec{B}	[T]	magnetická indukce
d_0	[mm]	počáteční průměr zkoušené délky zkušební tělesa
e	[C]	elementární náboj
E	[GPa]	modul pružnosti
\vec{E}	[N·C ⁻¹]	intenzita elektrického pole
E_k	[J]	kinetická energie elektronů
f	[Hz]	frekvence
\vec{F}	[N]	Lorenzova síla
F_e	[kN]	síla působící na mezi kluzu
F_m	[kN]	maximální síla
h	[mm]	hloubka průniku elektronů do materiálu
I_b	[mA]	proud svazku
KV	[J]	nárazová práce
L_0	[mm]	počáteční délka zkušební tyče
L_U	[mm]	konečná délka zkušební tyče
p	[Pa]	tlak
$\phi SPOT$	[mm]	křížiště
Re	[MPa]	mez kluzu
R_m	[MPa]	smluvní mez pevnosti
$R_m/R_{p0,2}$	[-]	míra deformačního zpevnění
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
σ_M	[MPa]	mez pevnosti v ohybu
$span$	[mm]	vzdálenost podpor
S_0	[mm ²]	počáteční obsah průřezu válcové tyče
S_U	[mm ²]	konečný obsah průřezu válcové tyče
$SURF$	[mA]	proud svazku
T	[°C]	teplota
U_A	[kV]	urychlovací napětí
v_p	[mm/s]	rychlost posuvu paprsku
\vec{v}	[mm/s]	rychlost elektronů
Z	[%]	kontrakce

SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Význam
EBW	electron beam welding
WIG	Wolfram Inert Gas
TIG	Tungsten Inert Gas
MIG	Metal Inert Gas
TOO	tepelně ovlivněná oblast

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1	Princip svařování metodou WIG.....	5
Obr. 1.2	Schéma zařízení pro svařování metodou MIG.....	6
Obr. 1.3	a) zkratový proces, b) bezzkratový (sprchový) proces.....	7
Obr. 1.4	Interakce elektronů s materiálem.	9
Obr. 1.5	Fáze vzniku „Key hole“.	10
Obr. 1.6	Schéma elektronového děla.	10
Obr. 1.7	Různá geometrie katody.	11
Obr. 1.8	Magnetická (fokusační) čočka.	11
Obr. 1.9	Deflektor vychylující elektronový svazek působením magnetického pole.	12
Obr. 1.10	Možnost modifikace tvaru průřezu elektronového svazku působením magnetického multipólu.	12
Obr. 2.1	Vady ve swarech podle tvaru a polohy.	14
Obr. 2.2	Zkušební těleso pro příčnou zkoušku tahem.	17
Obr. 2.3	Zkušební těleso pro podélnou zkoušku tahem.	18
Obr. 2.4	Typy zkušebních tělesek.	18
Obr. 2.5	Příčná zkouška ohýbacím trnem ze strany kořene svaru.	19
Obr. 2.6	Zkouška ohýbací kladkou.	19
Obr. 2.7	Měření tvrdosti řadou vtisků.	20
Obr. 2.8	Příklady oblastí jednotlivých vtisků.	20
Obr. 3.1	Struktura základního materiálu titanové slitiny Ti64.....	21
Obr. 3.2	Dodané polotovary slitiny Ti-6Al-4V a jejich označení.	22
Obr. 3.3	Schéma svařence.	23
Obr. 3.4	Zkušební deska slitiny Ti64 po svařování.....	23
Obr. 3.5	Řezný plán pro přípravu zkušebních těles.	24
Obr. 3.6	Označení a místa odběru zkušebních těles v koválnici „Deska 1“.....	24
Obr. 3.7	Zkušební těleso pro zkoušku tahem.	25
Obr. 3.8	Zkušební těleso pro zkoušku rázem v ohybu.	26
Obr. 3.9	Svařená ohybová tělesa ze slitiny Ti64 po ohybové zkoušce („Deska 1“).....	30
Obr. 3.10	Průběh mikrotvrdosti na jednotlivých vzorcích.	32
Obr. 3.11	Makrosnímky svaru.....	33
Obr. 3.12	Mikrostruktura základního materiálu.....	34
Obr. 3.13	Struktura základního materiálu v různých směrech.	34
Obr. 3.14	Mikrostruktura v jednotlivých oblastech svarového spoje.	35
Obr. 4.1	Průměrné hodnoty napěťových charakteristik.	37
Obr. 4.1	Průměrné hodnoty deformačních charakteristik.	37

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha I: Tahové diagramy zkušebních tyčí ze slitiny Ti64

Příloha II: Tahové diagramy zkušebních tyčí ze slitiny Ti64 obsahujících svar

Příloha III: Tahové diagramy zkušebních tyčí ze slitiny Ti64 obsahujících svar (kovadlinka)

Příloha IV: Ohybový diagram zkušebních těles ze slitiny Ti64 obsahujících svar

Test report

Test standard : CSN EN ISO 6892-1

Material : Ti64

Specimen type : DIN 50125, form "B", 6 x 30 mm

Machine data : Zwick Z250, Loadcell: 150 kN, Extensometer: MultiXtens

Pre-load : 4 MPa Speed in the yield range : 1 mm/min

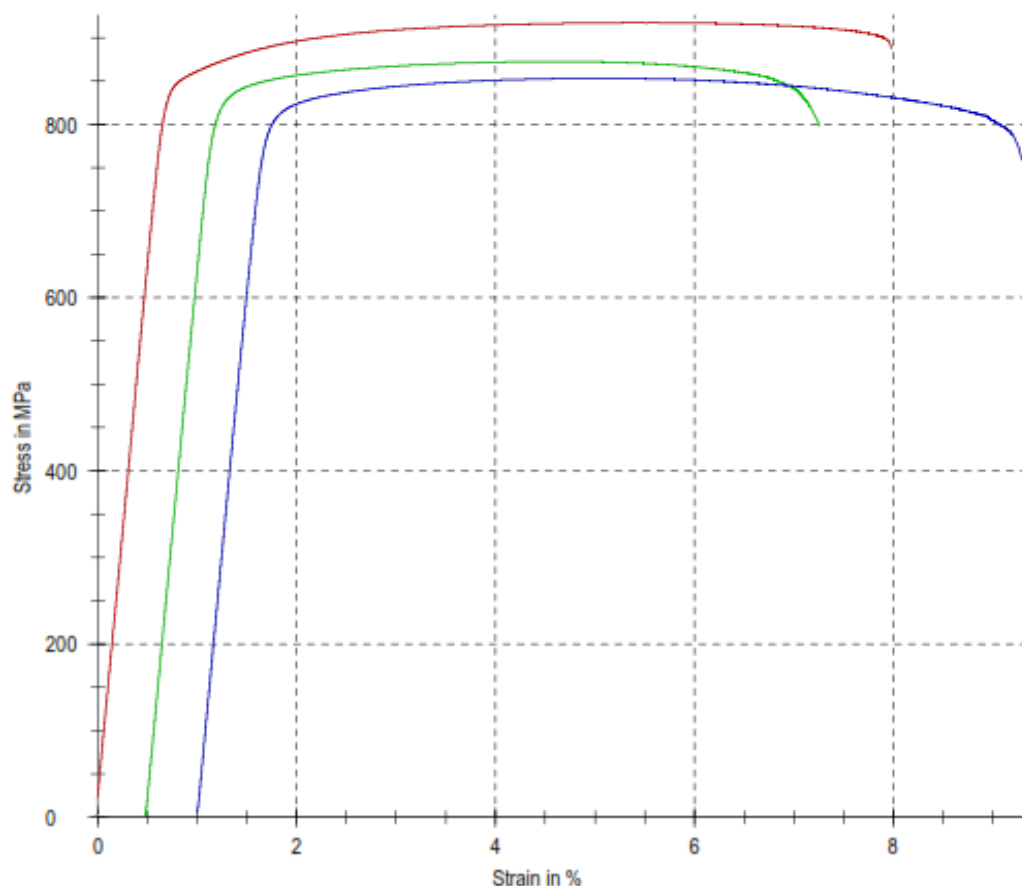
Speed, E-Modulus : 1 mm/min Test speed : 2 mm/min

Speed, yield point : 1 mm/min

Series description:

Legend	Specimen ID	Notes	d ₀ mm	L ₀ mm	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	R _{p0.2} /R _m %	A _g %	A %	Z %
■	T01	23 °C	6,010	30,01	122	854,4	917,7	93,11	4,6	7,3	16,5
■	T02	23 °C	6,024	30,00	122	835,7	872,8	95,75	3,4	6,1	17,7
■	T03	23 °C	6,011	29,99	122	815,6	853,4	95,57	3,5	7,7	30,4

Series graph:



Test report

Test standard : CSN EN ISO 6892-1

Material : Ti64-svar

Specimen type : DIN 50125, form "B", 6 x 30 mm

Machine data : Zwick Z250, Loadcell: 150 kN, Extensometer: MultiXtens

Pre-load : 4 MPa Speed in the yield range : 1 mm/min

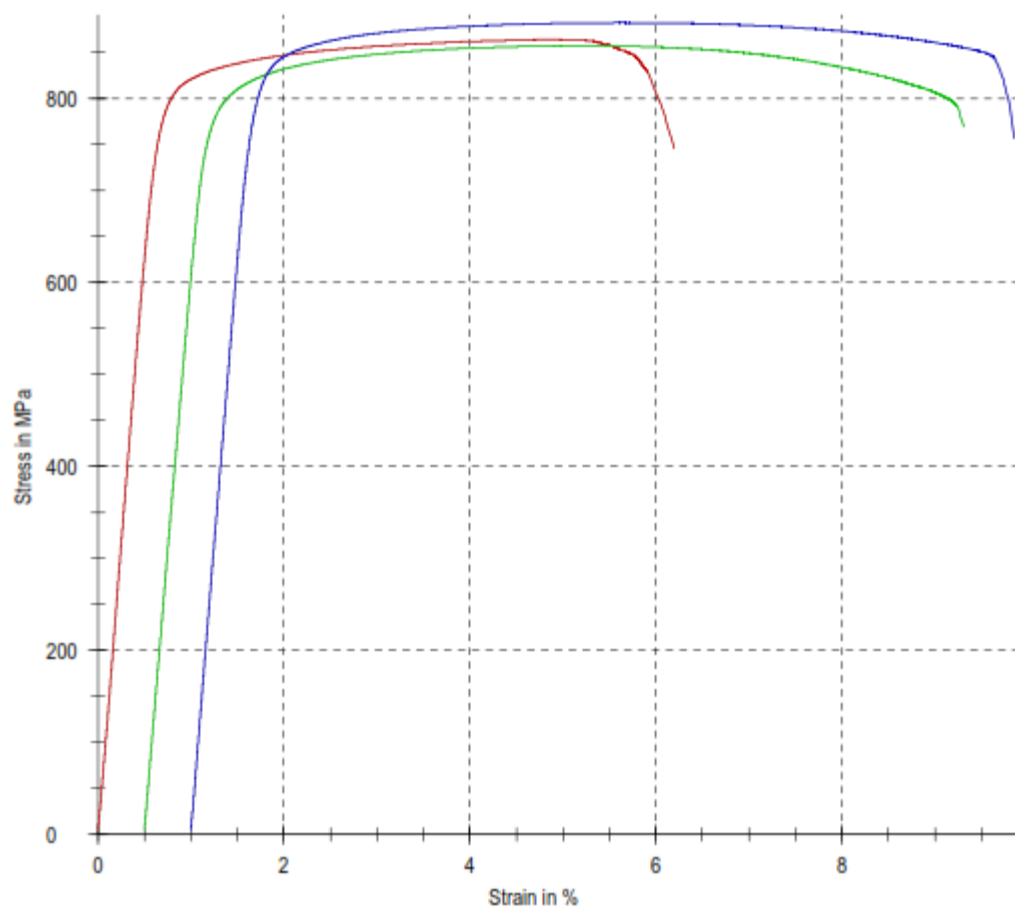
Speed, E-Modulus : 1 mm/min Test speed : 2 mm/min

Speed, yield point : 1 mm/min

Series description:

Legend	Specimen ID	Notes	d ₀ mm	L ₀ mm	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	R _{p0.2} /R _m %	A _g %	A %	Z %
■	S01T	23 °C	6,013	30,00	129	806,5	863,9	93,36	4,2	5,6	13,7
■	S02T	23 °C	6,018	30,00	122	794,9	857,2	92,73	4,0	8,2	24,5
■	S03T	23 °C	6,014	30,01	125	833,2	882,2	94,44	3,9	8,2	15,1

Series graph:



Test report

Test standard : CSN EN ISO 6892-1

Material : Ti-64- svar. spoj, kovadlinka - "deska 1"

Specimen type : DIN 50125, form "B", 6 x 30 mm

Machine data : Zwick Z250, Loadcell: 150 kN, Extensometer: MultiXtens

Pre-load : 2 MPa Speed in the yield range : 1 mm/min

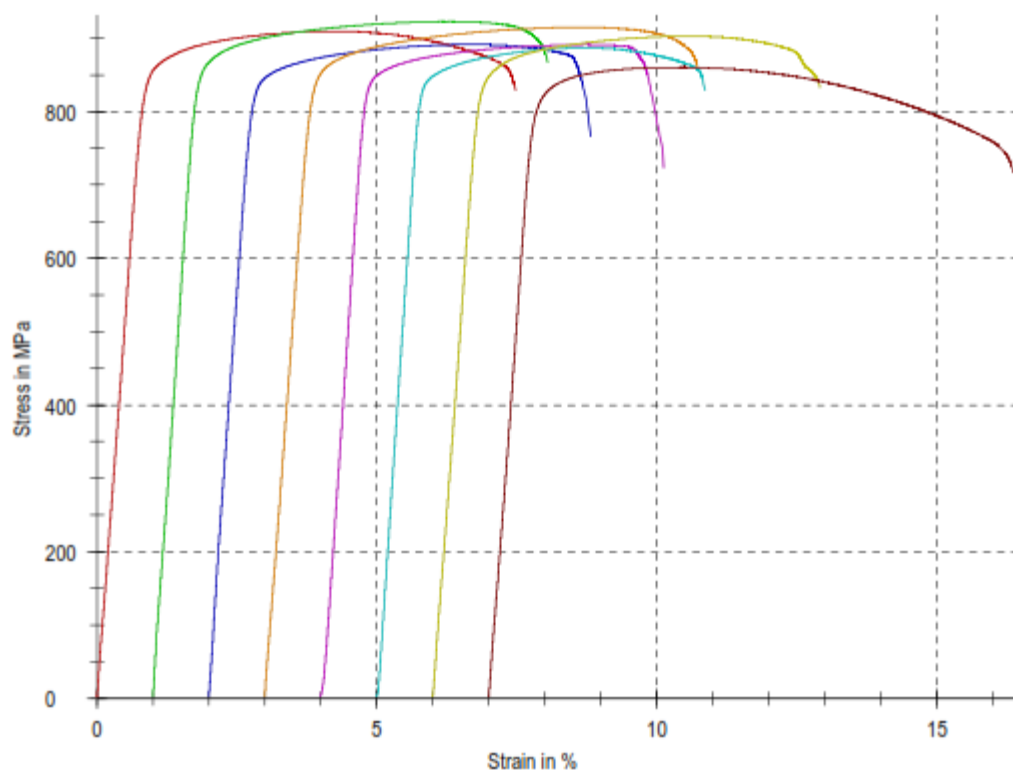
Speed, E-Modulus : 1 mm/min Test speed : 2 mm/min

Speed, yield point : 1 mm/min

Test results:

Legend	Specimen ID	Notes	d ₀ mm	L ₀ mm	m _E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	R _{p0.2} /R _m %	A _g %	A %	Z %
	Deska 1-1	23 °C	6,020	30,00	103,73	859,4	909,5	94,49	3,3	6,7	18,9
	Deska 1-2	23 °C	5,980	29,99	112,30	865,3	922,6	93,79	4,5	6,3	21,2
	Deska 1-3	23 °C	6,000	30,01	106,27	843,9	891,4	94,67	3,9	6,1	22,4
	Deska 1-4	23 °C	6,010	30,00	104,36	854,8	914,8	93,44	4,7	6,9	15,8
	Deska 1-5	23 °C	6,010	30,00	113,49	848,5	891,1	95,22	3,9	5,4	6,9
	Deska 1-6	23 °C	6,020	30,03	113,10	846,1	886,9	95,41	2,9	5,1	8,5
	Deska 1-7	23 °C	6,000	30,01	103,93	850,2	902,8	94,17	3,7	6,1	13,6
	Deska 1-8	23 °C	6,010	30,00	105,37	822,9	860,4	95,64	2,7	8,7	30,8

Series graph:



**imse**INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE
AND ENGINEERING

Příloha IV

Test report

Test standard : CSN EN ISO 5173

Material : Ti64, svar. spoj, kovadlinka - "deska 1"

Specimen type : 5 x17 mm, span 43 mm

Machine data : Zwick/Roell Z250, Loadcell: 50 kN, Displacement: MultiXtens

Pre-load : 10 N

Speed, E-Modulus : 4 mm/min

Test speed : 4 mm/min

Test results:

Legend	Specimen ID	a ₀ mm	b ₀ mm	Span mm	R _p 0.2 MPa	F _{max} N	σ _M MPa	Notes
■	1	5,15	16,88	43,0	1668	14461	2083	Lom ve svaru
■	2	5,15	16,87		1622	14566	2100	Lom ze svaru do ZM
■	3	5,16	16,87		1703	14326	2057	Lom ze svaru do ZM
■	4	5,1	16,85		1708	13590	2000	Lom ve svaru

Series graph:

